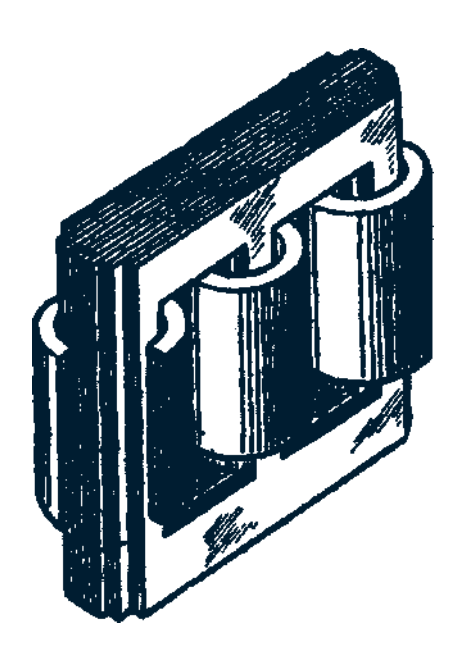
А.Л. Кислицын



ТРАНСФОРМАТОРЫ

Учебное пособие



Ульяновск 2001

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ульяновский государственный технический
университет

А.Л. Кислицын

Трансформаторы

Учебное пособие по курсу «Электромеханика»

Ульяновск 2001

УДК 621.3 (075)
ББК 31.261.8я7
К44

Рецензент канд. техн. наук Петров В.М.

Утверждено редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия

Кислицын А.Л.
К44 Трансформаторы: Учебное пособие по курсу «Электромеханика» .- Ульяновск: УлГТУ, 2001. - 76 с. ISBN 5-89146-20(2-8

Составлено в соответствии с учебными планами подготовки бакалавров по направлениям 55.13.00 «Электротехника, электромеханика и электротехнология» и 55.17.00 «Электроэнергетика» для студентов дневной и безотрывной форм обучения. Пособие выполнено в соответствии с программами курса «Электрические машины», «Электромеханика», является кратким конспектом основных разделов вышеназванных учебных дисциплин. Содержит контрольные вопросы для самопроверки и задачи с решениями и ответами.

Работа подготовлена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

УДК 621.3(075)
ББК 31.261.8я7

ISBN 5-89146-202-8

ПРЕДИСЛОВИЕ

В энергетической системе трансформатор является важнейшим элементом. Передача большой мощности на дальние расстояния практически может быть осуществлена только при относительно небольшом значении тока и, следовательно, при высоком напряжении.

В начале линии электропередачи устанавливаются трансформаторы, повышающие напряжение переменного тока, вырабатываемого на электрических станциях. В конце линии электропередачи устанавливаются понижающие напряжение трансформаторы, так как для распределения энергии по потребителям необходимы сравнительно низкие напряжения.

Благодаря промышленному освоению новых магнитных и конструкционных материалов, применению интенсивных систем охлаждения, совершенствованию технологии электромашиностроения заметно улучшаются массогабаритные и энергетические показатели трансформаторов.

В предлагаемом учебном пособии с единых методических позиций изложены общие вопросы теории трансформатора, рассмотрены основные физические законы и процессы в установившихся и переходных режимах.

В связи с тенденцией дальнейшего сокращения объема аудиторных часов автор считает, что данное учебное пособие должно быть использовано студентами при подготовке к лекционным и практическим занятиям, а также при самостоятельной работе.

Автор считает своим приятным долгом выразить глубокую признательность доценту кафедры ТОЭ УлГТУ Петрову В.М. за обстоятельный разбор материала, советы и рекомендации, способствующие улучшению содержания учебного пособия.

Автор приносит искреннюю благодарность студенту энергетического факультета УлГТУ Бугрову А.В. за большую помощь в подготовке этого учебного пособия, выразившуюся в подборе материалов, составлении и решении типовых задач, отборе вопросов самоконтроля, а также техническом оформлении.

ВВЕДЕНИЕ

Восьмидесятые годы прошлого столетия вошли в историю техники под названием периода «трансформаторных битв». Такое необычное название они получили потому, что изобретение трансформатора явилось одним из сильнейших аргументов в пользу переменного тока. А настоящая битва шла между сторонниками постоянного и переменного токов и отражала поиски путей выхода из назревшего энергетического кризиса, связанного с проблемой централизованного производства электроэнергии и передачей её на большие расстояния.

Схематичное изображение будущего трансформатора впервые появилось в 1831 году в работах Фарадея и Генри. Однако ни тот, ни другой не отмечали в своем приборе такого свойства трансформатора, как изменение напряжений и токов, то есть трансформирование переменного тока.

В 1836 году ирландский физик Николас Каллан изобрел индукционную катушку. В 1838 году это изобретение повторил американский изобретатель Чарльз Пейдж, но наибольшую известность получил немецкий механик Генрих Румкорф, именем которого впоследствии стали называть индукционную катушку.

П.Н. Яблочков отчетливо понял роль индукционной катушки как средства электрического разделения цепей переменного тока. Даже самим фактом патентования системы «дробления света» во многих странах он так подчеркивал важность нового предложения. Бобины, как их тогда называли, имели одинаковое число витков в первичной и вторичной обмотках, стальной сердечник был разомкнутым и представлял собой стержень, на который наматывались обмотки.

Становилось все яснее, что система электроснабжения на постоянном токе не имеет перспектив. Из опыта эксплуатации дуговых источников света было установлено оптимальное напряжение ПО В. Радиус электроснабжения не превышал нескольких сотен метров. И основным направлением развития электроэнергетики становилась система переменного тока.

Новым шагом в использовании трансформаторов с разомкнутым сердечником для распределения электроэнергии явилась «система распределения электричества для производства света и двигательной силы», запатентованная во Франции в 1882 году Голяром и Гиббсом. Трансформаторы Голяра и Гиббса предназначались уже для преобразования напряжения, то есть имели коэффициент трансформации отличный от единицы. Трансформаторы с разомкнутым сердечником в 1883 году устанавливаются на подстанциях Лондонского метрополитена, а 1884 году - в Турине (Италия).

Первые трансформаторы с замкнутыми сердечниками были созданы в Англии в 1884 году братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсон. Сердечник этого трансформатора набран был из стальных полос или проволок, разделенных изоляционным материалом, что снижало потери на вихревые токи. На сердечнике помещались, чередуясь, катушки высшего и низшего напряжения.

Впервые предложения о параллельном включении трансформаторов высказал Р. Кеннеди в 1883 году, но более всесторонне этот способ соединения был обоснован венгерским электротехником Максом Дери, который в 1885 году получил патент на параллельное включение первичных и вторичных обмоток трансформаторов и показал преимущество такого включения. Независимо от него аналогичный патент в Англии получил С.Ц. Ферранти.

Передача электрической энергии переменным током высокого напряжения оказалась возможной после создания однофазного трансформатора с замкнутой магнитной системой. Такой трансформатор в нескольких модификациях (кольцевой, броневой и стержневой) был разработан в 1885 году венгерскими электротехниками М. Дерри, О. Блати и К. Циперновским, впервые предложившими и сам термин трансформатор. Венгерские инженеры нашли оптимальное соотношение между расходом меди и стали в трансформаторах.

Русский инженер Доливо-Добровольский выступил с предложением применять для целей передачи и эксплуатации электроэнергии разработанную им систему трехфазного тока. Доливо-Добровольский показал, что в отношении передачи электроэнергии система трехфазного тока, по сравнению с системой двухфазного тока, является более экономичной, но решающее преимущество трехфазной системы он видел «в превосходных качествах» разработанных им трехфазных асинхронных двигателей. В этом направлении он провел огромную творческую работу: доказал, что при помощи трехфазного тока можно создать в машине такое же вращающееся магнитное поле, как и при помощи двухфазного тока, разработал основные модификации трехфазного асинхронного двигателя. Параллельно с этим Доливо-Добровольский разработал конструкцию трехфазного трансформатора сначала,в 1890 г., с расположением сердечников по кругу и кольцевыми ярмами, а затем с обычным в настоящее время расположением стержней в одной плоскости. А так как,кроме этого, Доливо-Добровольский много работал в области теории, расчета и конструирования электрических машин, то можно сказать, что он разработал собственно все элементы трехфазной системы. Предложенная Доли-во-Добровольским система трехфазного тока вызвала живейший интерес и привлекла к себе повсеместное внимание. Несмотря на ряд возражений, ее технические достоинства были настолько велики и очевидны, что уже в ближайшее время она заняла ведущее место в ряду других систем.

1. Основные определения, принцип действия и классификация трансформаторов

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

В общем случае вторичная система переменного тока может отличаться любыми параметрами: величиной напряжения и тока, числом фаз, формой кривой напряжения (тока), частотой.

Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи и распределения электроэнергии имеют силовые трансформаторы, посредством которых изменяют величину переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными.

Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника, выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 1). Одна из обмоток присоединена к источнику переменного тока *Г* на напряжение *u*), эту обмотку называют *первичной*. К другой обмотке подключен потребитель Z_H, ее называют *вторичной*.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток /j, который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Ф. Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуктирует в них ЭДС:

$$e_1 = -w_1(d\Phi / dt);$$
$$e_2 = -w_2(d\Phi / dt),$$ (П

где *Щ* и W_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

При подключении нагрузки Z_H к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС *e* в цепи этой обмотки создается ток $/_2$, а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2. В повышающих трансформаторах U_2 > C/j , а в понижающих U_2 <*U*.

Из (1} и (2J следует, что ЭДС *e* и £$_2$ отличаются друг от друга числом витков обмоток, в которых они наводятся. Поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

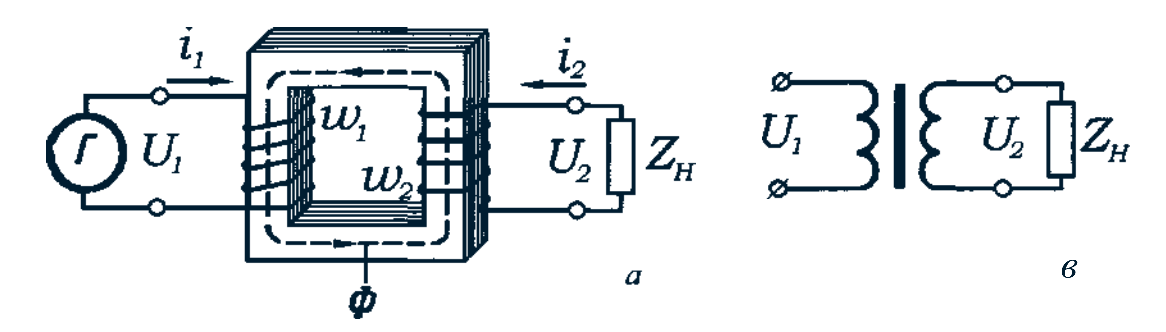


Рис. 1. Конструктивная (а) и принципиальная (б) схемы однофазного двухобмоточного трансформатора

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, - *обмоткой низшего напряжения* (НН).

Трансформаторы обладают свойством обратимости: один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он является повышающим, либо понижающим

Трансформатор — это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным как по величине, так и по направлению (*d01 dt* = 0). Поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС.

Конструкция трансформаторов в значительной степени зависит от их назначения, по этому признаку трансформаторы разделяют на следующие основные виды:

1) силовые, применяемые: а) в системах передачи и распределения электроэнергии; б) для установок со статическими преобразователями (ионными или полупроводниковыми) при преобразовании переменного тока в постоянный (выпрямители) или постоянного в переменный (инверторы); в) для

получения требуемых напряжений в цепях управления электроприводами и в цепях местного освещения;

2) силовые специального назначения — печные, сварочные т. п.;
3) измерительные — для включения электрических измерительных приборов в сети высокого напряжения или сильного тока;
4) испытательные — для получения высоких и сверхвысоких напряжений, необходимых при испытаниях на электрическую прочность электроизоляционных изделий;
5) радиотрансформаторы — применяемые в устройствах радио- и проводной связи, в системах автоматики и телемеханики для получения требуемых напряжений, согласования сопротивлений электрических цепей, гальванического разделения цепей и др.

Трансформаторы одного и того же назначения могут различаться: *по виду охлаждения* — с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением;
по числу трансформируемых фаз — однофазные и многофазные; *по форме магнитопровода* — стержневые, броневые, бронестержне-вые, тороидальные;

по числу обмоток — двухобмоточные и многообмоточные (одна первичная и две или более вторичных обмоток);

по конструкции обмоток — с концентрическими и чередующимися обмотками.

2. Устройство трансформаторов

Основные части трансформатора — это магнитопровод и обмотки. Магнитопровод трансформатора выполняют из листовой электротехнической стали. Перед сборкой листы с двух сторон изолируют лаком. Такая конструкция магнитопровода дает возможность в значительной степени ослабить в нем вихревые токи. Часть магнитопровода, на которой располагают обмотки, называют *стержнем.*

В стержневых трансформаторах имеются два стержня и соединяющих их два ярма (рис. 2, а). Броневые трансформаторы имеют разветвленный магнитопровод с одним стержнем и ярмами, частично прикрывающими («бронирующими») обмотки (рис. 2, б).

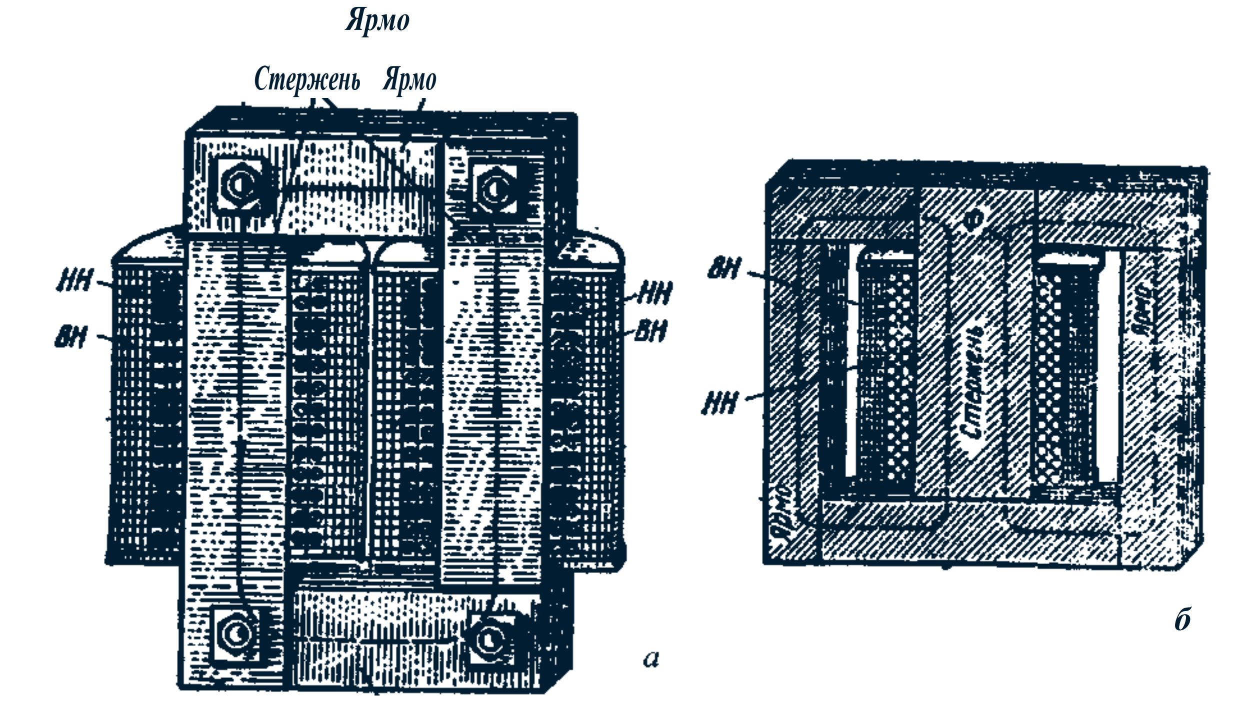


Рис. 2. Однофазные трансформаторы стержневого (а) и броневого (б) типов

Стержневая конструкция имеет наибольшее распространение, особенно в трансформаторах большой и средней мощности. Достоинства этой конструкции — простота изоляции обмоток, лучшие условия охлаждения, простота ремонта.

Однофазные трансформаторы малой мощности чаще имеют броневую конструкцию, что позволяет уменьшить габариты трансформатора. Кроме того, боковые ярма защищают обмотку от механических повреждений; это важно для трансформаторов малой мощности, которые часто не имеют защитного кожуха и располагаются вместе с другим электрооборудованием на общей панели или в общем шкафу.

Трехфазные трансформаторы обычно выполняют на магнитопроводе стержневого типа с тремя стержнями (рис. 3).

Рис.3. Трехфазный трансформатор стержневого типа: 1 - магнитопровод; 2 - обмотки

В трансформаторах большой мощности применяют бронестержневую конструкцию магнитопровода (рис. 4), которая хотя и требует несколько повышенного расхода электротехнической стали, но позволяет, уменьшить высоту

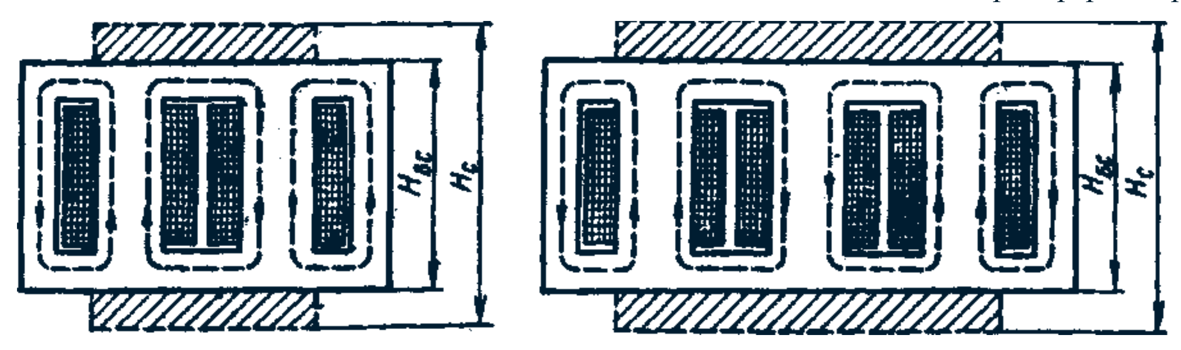


Рис. 4. Магнитопроводы бронестержневого трансформатора:
однофазного (а); трехфазного (б)

магнитопровода ($H_{БС}$ < $H_с$), а следовательно, и высоту трансформатора. Это имеет большое значение при его перевозке в собранном виде.

По способу соединения стержней с ярмами различают магнитопроводы стыковые (рис. 5, а) и шихтованные (рис. 5, б). В стыковых магнитопроводах стержни и ярма собирают раздельно, а затем соединяют посредством крепежных частей. Такая конструкция магнитопровода облегчает посадку обмоток на стержни, так как для этого достаточно снять только верхнее ярмо. Но при шихтовой сборке магнитопровода, когда листы (полосы) собирают «внахлестку», воздушный зазор в месте стыка стержней и ярем может быть сделан минимальным, что значительно снизит магнитное сопротивление магнитопровода. Кроме того, механическая прочность шихтованного магнитопровода намного выше, чем стыкового. Все это привело к тому, что шихтованные магнитопроводы получили основное применение. Листы магнитопровода стягивают посредством шпилек *4* и накладок 7, изолированных от листов изоляционными шайбами 2 и трубками *3* (рис. 6).

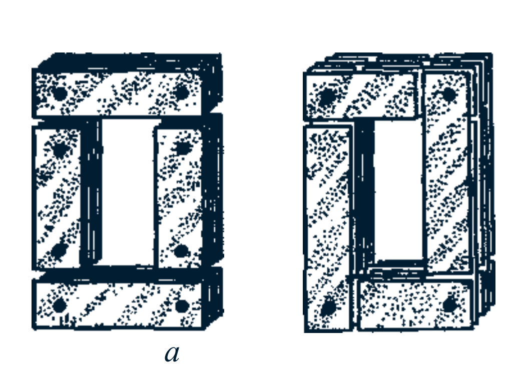


Рис. 5. Сборки магнитопровода

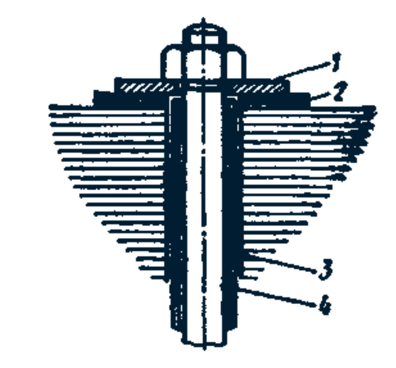


Рис. 6. Изоляция шпильки, стягивающей листы магнитопровода

В последнее время сборку листов (полос) магнитопровода в пакет выполняют наложением на стержни и ярма бандажа из стекловолоконной ленты.



Рис. 7. Форма сечения стержня

Форма поперечного сечения стержней зависит от мощности трансформатора: в небольших трансформаторах применяют стержни прямоугольного сечения (рис. 7, а), в трансформаторах средней и большой мощности — стержни ступенчатого сечения (рис. 7, б, в) с числом ступеней, возрастающим с увеличением мощности трансформатора. Ступенчатое сечение стержней обеспечивает лучшее использование пло-

щади внутри обмотки, так как периметр ступенчатого стержня приближается к окружности. В трансформаторах большой мощности для улучшения теплоотдачи между пакетами стали магнитопровода устраивают вентиляционные каналы (рис. 7, в).

Обмотки трансформаторов выполняют из проводов круглого и прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой.

Обмотки бывают *цилиндрические*, располагаемые на стержнях, *концентрические* (рис. 8, а) и *дисковые*, располагаемые на стержнях в чередующемся порядке (рис. 8, б).

Магнитопровод трансфор матора вместе с кожухом или ба ком заземляют, что обеспечивает безопасность обслуживания трансформатора в случае, если изоляция обмотки окажется про битой.

Возможны два варианта взаимного расположения обмоток на стержнях магнитопроводов: раздельное

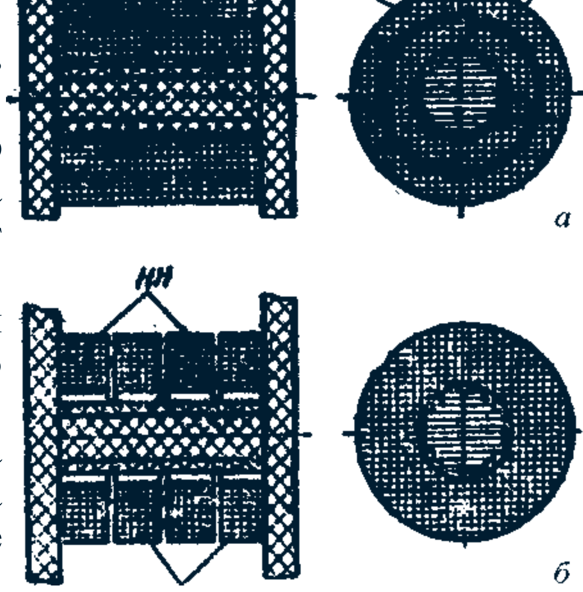


Рис. 8. Обмотки трансформаторов *НН)*

применяют весьма редко и только в высоковольтных транс-

расположение (на одном стержне обмотка *ВН*, а на другом

форматорах, так как это создает лучшие условия для надежной изоляции обмотки *ВН* от обмотки *НН;* однако в этом случае наблюдается увеличение магнитного потока рассеяния; наиболее распространено равномерное концентрическое расположение обмоток на всех стержнях магнитопровода (см. рис. 2, а), так как это обеспечивает малую величину магнитного потока рассеяния. При этом обычно ближе к стержню располагают обмотку *НН,* так как она требует меньшей электрической изоляции от стержня (заземленного), затем укладывают слой изоляции из картона или бумаги и обмотку *ВН.*

В трансформаторах с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом (рис. 9). Омывая обмотки *2 и 3,* магнитопровод 7, трансформаторное масло отбирает от них тепло и, обладая более высокой теплопроводностью, чем воздух, через стенки бака *9* и трубы радиатора *8* отдает его в окружающую среду. Наличие трансформаторного масла обеспечивает более надежную работу высоковольтных трансформаторов, так как электрическая прочность масла намного выше, чем воздуха. Масляное охлаждение интенсивнее воздушного, поэтому габариты и вес масляных трансформаторов меньше, чем у сухих трансформаторов такой же мощности. В трансформаторах мощностью до 20 - 30 кВ . А применяют баки с гладкими стенками. У более мощных трансформаторов для увеличения охлаждаемой поверхности стенки бака делают ребристыми или же применяют трубчатые баки, как это показано на рис. 9.

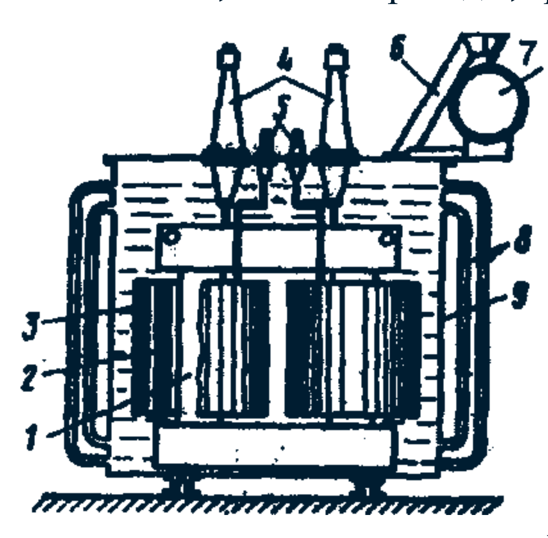


Рис. 9. Устройство трансформатора с масляным охлаждением: 1 - магнитопровод; 2 и 3 - обмотки *ВН* и *НН; 6* - выхлопная труба; 7 - расширитель; 8 - радиаторные трубы; 9-бак

Масло, нагреваясь, поднимается вверх и, охлаждаясь, опускается вниз. При этом масло циркулирует в трубах, что способствует более быстрому его охлаждению.

Для компенсации объема масла при изменении температуры, а также для защиты масла трансформатора от окисления и увлажнения при контакте с воздухом в трансформаторах применяют расширитель 7, представляющий собой цилиндрический сосуд, установленный на крышке бака и сообщающийся с ним. Колебания уровня масла с изменением его температуры проис-

ходят не в баке, который всегда заполнен маслом, а в расширителе, сообщающемся с атмосферой.

В процессе работы трансформаторов не исключена возможность возникновения в них явлений, сопровождающихся бурным выделением газов, что ведет к значительному увеличению давления внутри бака, поэтому во избежание повреждения баков трансформаторы мощностью 1000 кВ • А и выше снабжают выхлопной трубой *6,* которую устанавливают на крышке бака. Нижним концом труба сообщается с баком, а ее верхний конец заканчивается фланцем, на котором укреплен стеклянный диск. При давлении, превышающем безопасное для бака, стеклянный диск лопается,и газы выходят наружу.

Трансформаторы средней и большой мощности снабжены газовым реле. При возникновении в трансформаторе значительных повреждений, сопровождаемых обильным выделением газов (например, при коротком замыкании между витками обмоток), газовое реле срабатывает и замыкает контакты цепи управления выключателя, который отключает трансформатор от сети. Обмотки трансформатора с внешней цепью соединяют вводами *4* и 5, выполняемыми обычно из фарфора. К баку трансформатора прикреплен щиток, на котором указаны: номинальная мощность - мощность на зажимах вторичной обмотки, кВ . А; номинальное первичное напряжение, кВ; номинальное вторичное напряжение — напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора и номинальном первичном напряжении, кВ; номинальные токи трансформатора (первичный и вторичный), А.

3. Основы рабочего процесса трансформатора

3.1. Уравнение электродвижущих сил

Основной переменный магнитный поток Φ в магнитопроводе трансформатора, сцепляясь с витками обмоток w_1 и w_2 (рис. 10), наводит в них ЭДС:

$$e_1 = -w_1(d\Phi / dt); \; e_2 = -w_2(d\Phi / dt).$$

Предположим, что магнитный поток Φ является синусоидальной функцией времени, т. е.

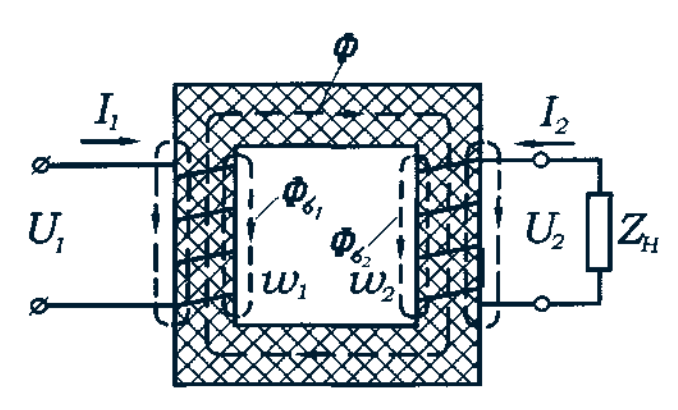


Рис. 10. Магнитные потоки в трансформаторе

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \tag{1}$$

где Φ_m — максимальное значение потока.

Тогда, подставив (1) в формулу ЭДС e_1 и дифференцируя, получим

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t. \tag{2}$$

Но так как $\cos \omega t = -\sin(\omega t - \pi/2)$, то

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2). \tag{3}$$

По аналогии,

$$e_2 = -\omega w_2 \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2). \tag{4}$$

Из (3) и (4) следует, что ЭДС e_1 и e_2 отстают по фазе от потока Φ на угол $\pi/2$. Максимальное значение ЭДС

$$E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m. \tag{5}$$

Разделив величину E_{1m} на $\sqrt{2}$ и подставив $\omega = 2\pi f$, получим формулу действующего значения первичной ЭДС (В):

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} w_1 f \Phi_m = 4{,}44 w_1 f \Phi_m. \quad (6)$$

Аналогично для вторичной ЭДС

$$E_2 = 4{,}44 w_2 f \Phi_m. \quad (7)$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения называют *коэффициентом трансформации*

$$k = E_1 / E_2 = w_1 / w_2 . \quad (8)$$

Токи в обмотках трансформатора I_1 и I_2 помимо основного магнитного потока Φ создают магнитные потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ (рис. 10). Каждый из этих потоков сцеплен с витками лишь собственной обмотки и индуктирует в ней ЭДС рассеяния. ЭДС рассеяния в первичной и во вторичной обмотках:

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1}(di_1 / dt); \quad e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2}(di_2 / dt),$$

где $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ — индуктивности рассеяния.

Так как магнитные потоки рассеяния замыкаются главным образом в немагнитной среде (воздух, масло, медь), магнитная проницаемость которой постоянна, то и индуктивности $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ можно считать постоянными.

Действующие значения ЭДС рассеяния пропорциональны токам в соответствующих обмотках:

$$-\dot{E}_{\sigma 1} = j\dot{I}_1 x_1; \quad -\dot{E}_{\sigma 2} = j\dot{I}_2 x_2, \quad (9)$$

где x_1 и x_2 — индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток. Знаки минус в (9) свидетельствуют о реактивном характере

ЭДС рассеяния. Таким образом, в каждой обмотке трансформатора индуктируются основная ЭДС и ЭДС рассеяния.

Рассмотрим действие этих ЭДС в обмотках трансформатора.

В первичной обмотке ЭДС $\dot{E}_1$ представляет собой ЭДС самоиндукции, а поэтому она направлена против первичного напряжения $\dot{U}_1$, т. е. находится с ним в противофазе. По второму закону Кирхгофа напряжение для первичной обмотки, после проведения преобразований, имеет вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 r_1$$

или

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 jx_1 + \dot{I}_1 r_1. \qquad (10)$$

Выражение (10) является уравнением равновесия ЭДС, согласно которому напряжение $\dot{U}_1$ уравновешивается суммой противодействующих ЭДС.

Произведение $\dot{I}_1 r_1$ представляет собой *активное падение напряжения в первичной обмотке*. Обычно напряжения $j\dot{I}_1 x_1$ и $\dot{I}_1 r_1$ невелики, а поэтому с некоторым приближением можно считать, что подведенное к трансформатору напряжение $\dot{U}_1$ уравновешивается ЭДС $\dot{E}_1$, т. е. $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$.

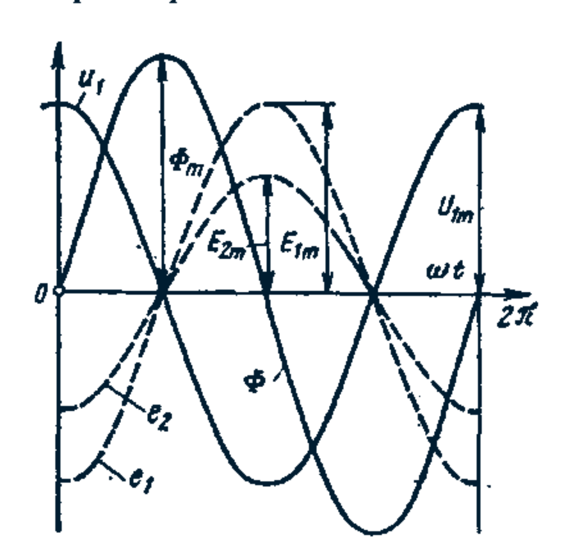


Рис 11. Изменение напряжений, ЭДС, магнитного потока трансформатора во времени

Во вторичной обмотке ток $\dot{I}_2$ зависит от величины ЭДС $\dot{E}_2$, которая в значительной части идет на создание напряжения на выводах вторичной обмотки: $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_н$. Оставшаяся часть ЭДС $\dot{E}_2$ идет на компенсацию ЭДС рассеяния и активного падения напряжения во вторичной обмотке $\dot{I}_2 r_2$. Таким образом, по второму закону Кирхгофа уравнение ЭДС для вторичной цепи

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2,$$

или

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{I}_2 Z_н. \qquad (11)$$

Изменение напряжений, ЭДС, магнитного потока трансформатора во времени показано на рисунке 11.

3.2. Уравнение намагничивающих сил и токов

Предположим, что трансформатор работает в режиме холостого хода (рис. 12, а), т.е. к зажимам его первичной обмотки подведено напряжение U_1, а вторичная обмотка разомкнута ($I_2 = 0$). Ток I_0 в первичной обмотке при этих условиях называют *током холостого хода.*

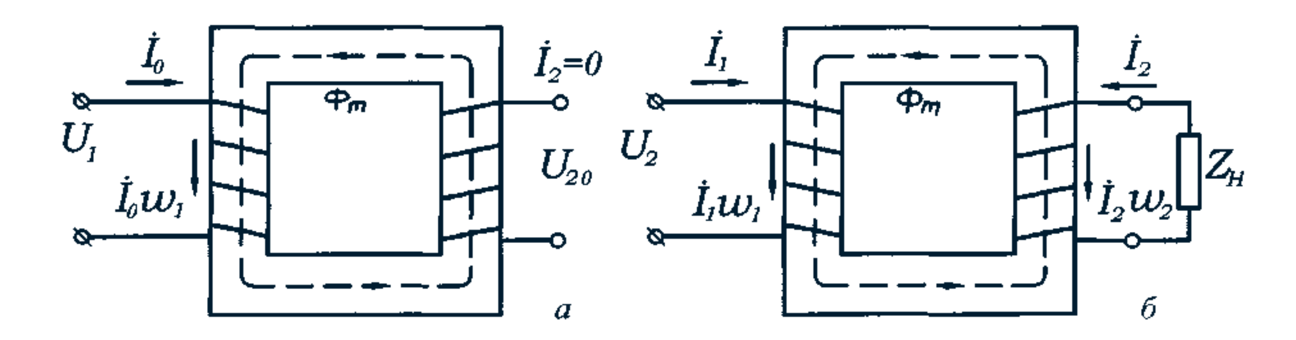


Рис. 12. Режимы холостого хода (а) и нагрузки (б) однофазного трансформатора

Намагничивающая сила, созданная этим током $I_0 w_1$, наводит в магнитопроводе трансформатора основной магнитный поток, максимальное значение которого

$$\Phi_m = \sqrt{2} \cdot \dot{I}_0 w_1 / R_м, \qquad (12)$$

где $R_м$ — магнитное сопротивление магнитопровода.

При замыкании вторичной обмотки на активно-индуктивную нагрузку $Z_н$ (рис. 12, б) в ней возникает ток I_2. При этом ток в первичной обмотке увеличивается до значения I_1.

Теперь поток Φ_m создается действием НС $I_1 w_1$ и НС $I_2 w_2$:

$$\Phi_m = \frac{\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2}{R_м} \sqrt{2}. \quad (13)$$

Этот поток можно также определить из (6):

$$\Phi_m = E_1 /(4{,}44 w_1 f)$$

или, принимая во внимание, что $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, получим

$$\Phi_m = U_1 /(4{,}44 w_1 f). \quad (14)$$

Из (14) следует, что основной поток Φ_m не зависит от нагрузки трансформатора, так как напряжение U_1 во всем диапазоне нагрузки трансформатора остается неизменным. Этот вывод дает право приравнять (12) и (13):

$$\frac{\dot{I}_0 w_1}{R_м} \sqrt{2} = \frac{\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2}{R_м} \sqrt{2}$$

или

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 . \quad (15)$$

Здесь $\dot{I}_0 w_1$ — НС, необходимая для создания в магнитопроводе трансформатора основного магнитного потока.

Выражение (15) представляет собой *уравнение намагничивающих сил трансформатора*. Из этого уравнения следует, что сумма НС первичной $\dot{I}_1 w_1$ и вторичной $\dot{I}_2 w_2$ обмоток равна постоянной величине — НС холостого хода $\dot{I}_0 w_1$.

Разделив уравнение НС на w_1, получим

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 w_2 / w_1 = \dot{I}_0$$

или

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0, \qquad (16)$$

где $\dot{I}'_2 = I_2 w_2 / w_1$ — вторичный ток, приведенный к числу витков первичной обмотки, т. е. ток, который в обмотке с числом витков w_1 дает такую же НС, что и ток I_2 во вторичной обмотке ($\dot{I}'_2 w_1 = \dot{I}_2 w_2$). Из (16) получаем выражение

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2, \qquad (17)$$

называемое *уравнением токов трансформатора.* Из этого уравнения следует, что первичный ток I_1 можно рассматривать как сумму двух составляющих: одна из них (I_0) создает основной магнитный поток, а другая ($-\dot{I}'_2$) компенсирует размагничивающее действие вторичного тока.

Физически это объясняется следующим. Так как ЭДС вторичной обмотки $\dot{E}_2$ представляет собой ЭДС взаимоиндукции, то ток $\dot{I}_2$ этой ЭДС при подключении нагрузки, в соответствии с правилом Ленца (индуцированный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле уменьшает изменение магнитного потока, являющегося причиной возникновения этого тока) оказывает размагничивающее влияние на магнитопровод трансформатора. Другими словами, ток $\dot{I}_2$ создает НС $\dot{I}_2 w_2$, направленную встречно НС первичной обмотки $\dot{I}_0 w_1$. Но так как основной магнитный поток в магнитопроводе остается практически неизменным, размагничивающее действие вторичного тока вызывает увеличение первичного тока до значения I_1, превышающего ток $\dot{I}_0$ на величину $-\dot{I}'_2$, необходимую для компенсации размагничивающего действия вторичного тока:

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1 - \dot{I}'_2 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1 \cdot$$

Таким образом, любое изменение величины тока во вторичной цепи трансформатора сопровождается соответствующим изменением первичного тока.

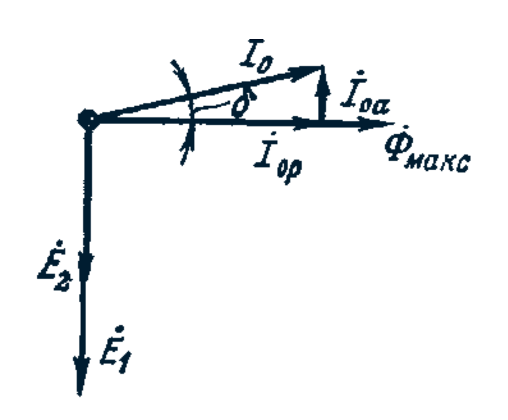


Рис. 13. Разложение тока холостого хода на активную и реактивную составляющие

Вследствие перемагничивания стали в магнитопроводе трансформатора возникают магнитные потери на гистерезис и вихревые токи. Мощность этих потерь эквивалентна активной составляющей тока холостого хода. Следовательно, ток холостого хода наряду с реактивной составляющей /0„, создающей основной магнитный поток, имеет еще и активную составляющую /0 :

$$I_0 = \sqrt{I^2{}_{0a} + I^2{}_{0p}} \quad (18)$$

Активная составляющая /oaне превышает 10% от тока /Oи поэтому оказывает незначительное влияние на величину этого тока. На рис. 13 представлена векторная диаграмма, на которой показаны векторы тока холостого хода и его составляющих. Угол *S,* на который вектор основного магнитного потока $Ф_{макс}$ отстает по фазе от тока холостого хода /0, называют *углом магнитных потерь.* Нетрудно заметить, что этот угол увеличивается с ростом активной составляющей тока холостого хода *1§a,* т. е. с ростом магнитных потерь в магнитопроводе.

Величина тока холостого хода в трансформаторах большой и средней мощности соответственно составляет 2—10% от номинального первичного тока. Данное обстоятельство может быть использовано при проведении инженерных расчётов без большой погрешности.

При нагрузке, близкой к номинальной, пренебрегая величиной тока /0 и преобразуя (16), получим

$$I_1 / I_2 = w_2 / w_1, \quad (19)$$

т.е. токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков этих обмоток: величина тока больше в обмотке с меньшим числом витков, и наоборот. Поэтому обмотки низшего напряжения выполняют проводом большего сечения, чем обмотки высшего напряжения, имеющие большее число витков.

4. Приведенный трансформатор

В общем случае параметры первичной обмотки трансформатора отличаются от параметров вторичной обмотки. Эта разница наиболее ощутима при больших коэффициентах трансформации, что затрудняет расчеты и построение векторных диаграмм, так как в этом случае векторы электрических величин первичной обмотки значительно отличаются по своей длине от одноименных векторов вторичной обмотки. Указанные затруднения устраняются приведением всех параметров трансформатора к одинаковому числу витков, обычно к числу витков первичной обмотки *Wi. С* этой целью все величины, характеризующие вторичную цепь трансформатора — ЭДС, напряжение, ток и сопротивления, — пересчитывают на число витков м^ (приводят к числу витков первичной обмотки).

Таким образом, вместо реального трансформатора с коэффициентом трансформации $k = w_1 / w_2$ получают эквивалентный трансформатор с $k = w_1 / w_2' = 1$, где $w_2' = w_1$. Такой трансформатор называют *приведенным*. Символом «штрих» обозначаются параметры приведённого трансформатора. Однако приведение вторичных параметров трансформатора не должно отразиться на его энергетических показателях: все мощности и фазовые сдвиги во вторичной обмотке приведенного трансформатора должны остаться такими, как и в реальном трансформаторе.

Так, из условия постоянства потока в приведённом трансформаторе и в реальном:

$$\Phi = \frac{E_2}{4{,}44 w_2 f} = \frac{E_2'}{4{,}44 w_1 f} \quad .$$

При приведении должен сохраниться коэффициент мощности

$$\cos\varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1},$$

где $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$ — ток в первичной обмотке;

I_{1a} — активная составляющая тока в первичной обмотке;

I_{1p} — реактивная составляющая тока в первичной обмотке.

Основной магнитный поток зависит от тока. Основной магнитный поток при приведении не изменяется,следовательно, при приведении I_{1a}, I_{1p} и I_1 не изменяются. Значит, $\cos\varphi_1{}' = \cos\varphi_1$.

Электромагнитная мощность вторичной обмотки реального трансформатора $E_2 I_2$ должна быть равна электромагнитной мощности вторичной обмотки приведенного трансформатора:

$$E_2 I_2 = E_2' I_2' . \quad (20)$$

Подставив значение приведенного вторичного тока $I_2' = I_2 k$ в (20), получим формулу приведенной вторичной ЭДС:

$$E_2' = \frac{I_2}{I_2'} E_2 = \frac{I_2}{I_2} k E_2 = E_2 k . \quad (21)$$

Аналогично определяют приведенное напряжение вторичной обмотки: так как $U_2 I_2 = U_2' I_2'$, то

$$U_2' = U_2 k . \quad (22)$$

Из условия равенства потерь в активном сопротивлении вторичной обмотки имеем

$$I_2^2 r_2 = I_2'^2 r_2' .$$

Определим приведенное активное сопротивление:

$$r_2' = r_2 (I_2 / I_2')^2 = r_2 k^2 . \quad (23)$$

Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки определяют из условия равенства реактивных мощностей $I_2^2 x_2 = I_2'^2 x_2'$, откуда

$$x_2' = x_2 k^2. \tag{24}$$

Приведенное полное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$Z_2' = r_2' + jx_2' = k^2(r_2 + jx_2) = Z_2 k^2. \tag{25}$$

Приведенное полное сопротивление нагрузки, подключенной на выводы вторичной обмотки, определим по аналогии с (25):

$$Z_н' = Z_н k^2. \tag{26}$$

При приведении должен сохраниться КПД

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1} = 1 - \frac{P_{э1} - P_м - P_{э2}}{P_1},$$

где P_1 — активная мощность в первичной обмотке; $P_{э1} = I_1^2 r_1$ — электрические потери в первичной обмотке; $P_{э2} = I_2^{2'} r_2'$ — электрические потери во вторичной обмотке; $P_м = E_1 I_{0a}$ — магнитные потери.

Так как все величины, кроме $P_{э2}$, относятся к первичной обмотке, то необходимо доказать равенство $P_{э2}$ в приведенном трансформаторе и в реальном $I_2^2 r_2 = I_2^{2'} r_2'$.

Это возможно при $r_2' = r_2(I_2 / I_2')^2 = r_2 k^2$.

Уравнения ЭДС и токов для приведенного трансформатора имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 \\
&\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 = \dot{I}'_2 Z'_н \\
&\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2
\end{aligned}\right\} \qquad (27)$$

5. Электрическая схема замещения трансформатора

Еще одним средством, облегчающим исследование электромагнитных процессов и расчет трансформаторов, является применение электрической схемы замещения приведенного трансформатора.

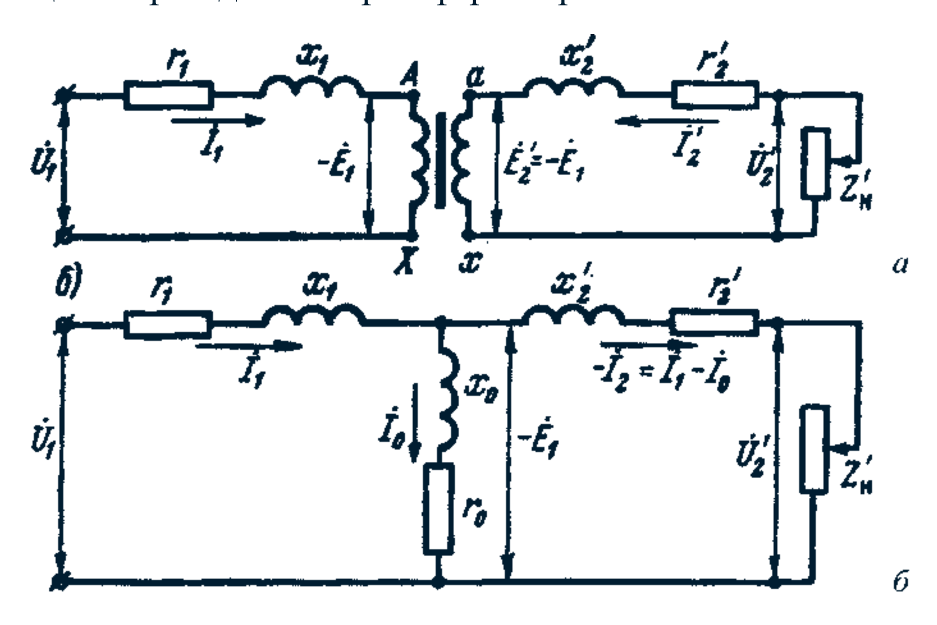


Рис. 14. Приведённый трансформатор

На рис. 14,а представлена эквивалентная схема приведенного трансформатора, на которой сопротивления *Г* и *X* условно вынесены из соответствующих обмоток и включены последовательно им. Как было установлено, в приведенном трансформаторе $k = 1$, а поэтому *Б* = E'_2. В результате точки *А и а*, *а* также точки *X* и *x* на приведенном трансформаторе имеют одинаковые потенциалы, что позволяет электрически соединить указанные точки, получив Т-образную схему замещения приведенного трансформатора (рис. 14, б). В электрической схеме замещения трансформатора магнитная связь между цепями заменена электрической.

Схема замещения трансформатора удовлетворяет всем уравнениям ЭДС и токов приведенного трансформатора (27) и представляет собой совокупность трех ветвей: первичной — сопротивлением $Z_1 = r_1 + jx_1$ и током $\dot{I}_1$; намагничивающей — сопротивлением $Z_m = r_m + jx_m$ и током I_0 и вторичной ветви с двумя сопротивлениями — сопротивлением собственно вторичной ветви $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ и сопротивлением нагрузки $Z'_н = r'_н \pm jx_н$ и током $-I'_2$. Изменением сопротивления нагрузки $Z'_н$ на схеме замещения могут быть воспроизведены все режимы работы трансформатора.

Необходимо обратить внимание, что знак минус тока $\dot{I}'_2$ указывает на то, что НС вторичной обмотки направлена встречно НС первичной обмотки. Параметры ветви намагничивания $Z_m = r_m + jx_m$ определяются величиной тока холостого хода. Наличие в этой ветви активной составляющей r_m обусловлено магнитными потерями в трансформаторе, а x_m - сопротивлением взаимоиндуктивности.

Все параметры схемы замещения, за исключением $Z'_н$, являются постоянными для данного трансформатора и могут быть определены из опыта холостого хода и опыта КЗ.

6. Векторная диаграмма трансформатора

Воспользовавшись схемой замещения приведенного трансформатора и основными уравнениями ЭДС и токов (27), построим векторную диаграмму трансформатора, наглядно показывающую соотношения между токами, ЭДС и напряжениями трансформатора. *Векторная диаграмма* — графическое выражение основных уравнений приведенного трансформатора (27).

Построение диаграммы (рис. 15, а) следует начинать с вектора максимального значения основного магнитного потока:

$$\Phi_m = E_1 / (4{,}44 f w_1).$$

Вектор тока $\dot{I}_0$ опережает по фазе вектор потока $\Phi_{макс}$ на угол δ, а ЭДС $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ отстают на угол 90°. Далее строим вектор $\dot{I}'_2$.

Для определения угла сдвига фаз между $\dot{E}'_2$ и $\dot{I}'_2$ следует знать характер нагрузки. Предположим, что нагрузка трансформатора активно-индуктивная. Тогда вектор $\dot{I}'_2$ отстает по фазе от $\dot{E}'_2$ на угол

$$\psi_2 = arctg\frac{x'_2 + x'_н}{r'_2 + r'_н}, \qquad (28)$$

определяемый как родом внешней нагрузки, так и собственными сопротивлениями вторичной обмотки.

Для построения вектора вторичного напряжения $\dot{U}'_2$ необходимо из вектора ЭДС $\dot{E}'_2$ вычесть векторы падений напряжения $j\dot{I}'_2 x'_2$ и $\dot{I}'_2 r'_2$. С этой целью из конца вектора $\dot{E}'_2$ опускаем перпендикуляр на направление вектора тока $\dot{I}'_2$ и откладываем на нем вектор $-j\dot{I}'_2 x'_2$. Затем проводим прямую, параллельную $\dot{I}'_2$, и на ней откладываем вектор $-\dot{I}'_2 r'_2$. Построив вектор $-\dot{I}'_2 Z'_2$, получим треугольник внутренних падений напряжения во вторичной цепи. Затем из точки O проводим вектор $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$, который опережает ток $\dot{I}'_2$ на угол $\varphi_2 = arctg(x'_н / r'_н)$. Вектор первичного тока строим как векторную сумму $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2$. Вектор $-\dot{I}'_2$ проводим из конца вектора $\dot{I}_0$ противоположно вектору $\dot{I}'_2$. Построим вектор $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$, для чего к вектору $-\dot{E}_1$, опережающему вектор потока Φ_m на 90°, прибавляем векторы внутренних падений напряжения первичной обмотки: вектор $\dot{I}_1 r_1$, параллельный току $\dot{I}_1$, и вектор $j\dot{I}_1 x_1$, опережающий вектор тока $\dot{I}_1$ на угол 90°. Соединив точку O с концом вектора $\dot{I}_1 Z_1$, получим вектор $\dot{U}_1$, который опережает по фазе вектор тока $\dot{I}_1$ на угол φ_1.

Иногда векторную диаграмму трансформатора строят с целью определения ЭДС обмоток. В этом случае заданными являются параметры вторичной обмотки: U_2; I_2 и $\cos\varphi_2$. Зная w_1 / w_2, определяют $\dot{U}'_2$ и $\dot{I}'_2$, а затем строят векторы этих величин под фазовым углом φ_2 друг к другу. Вектор ЭДС $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$ получают геометрическим сложением вектора напряжения U'_2 с падениями напряжения во вторичной обмотке $\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + j\dot{I}'_2 x'_2 + \dot{I}'_2 r'_2$.

В случае активно-емкостной нагрузки векторная диаграмма трансформатора имеет вид, показанный на рис. 15, б. Порядок построения диаграммы остается прежним, но вид ее несколько изменяется. Ток *1^* в этом случае опережает по фазе ЭДС *E* на угол

$$\psi_2 = arctg\frac{x_2' - x_н'}{r_2' + r_н'} \qquad (28а)$$

При значительной емкостной нагрузке трансформатора падение напряжения в емкостной составляющей сопротивления нагрузки и индуктивное

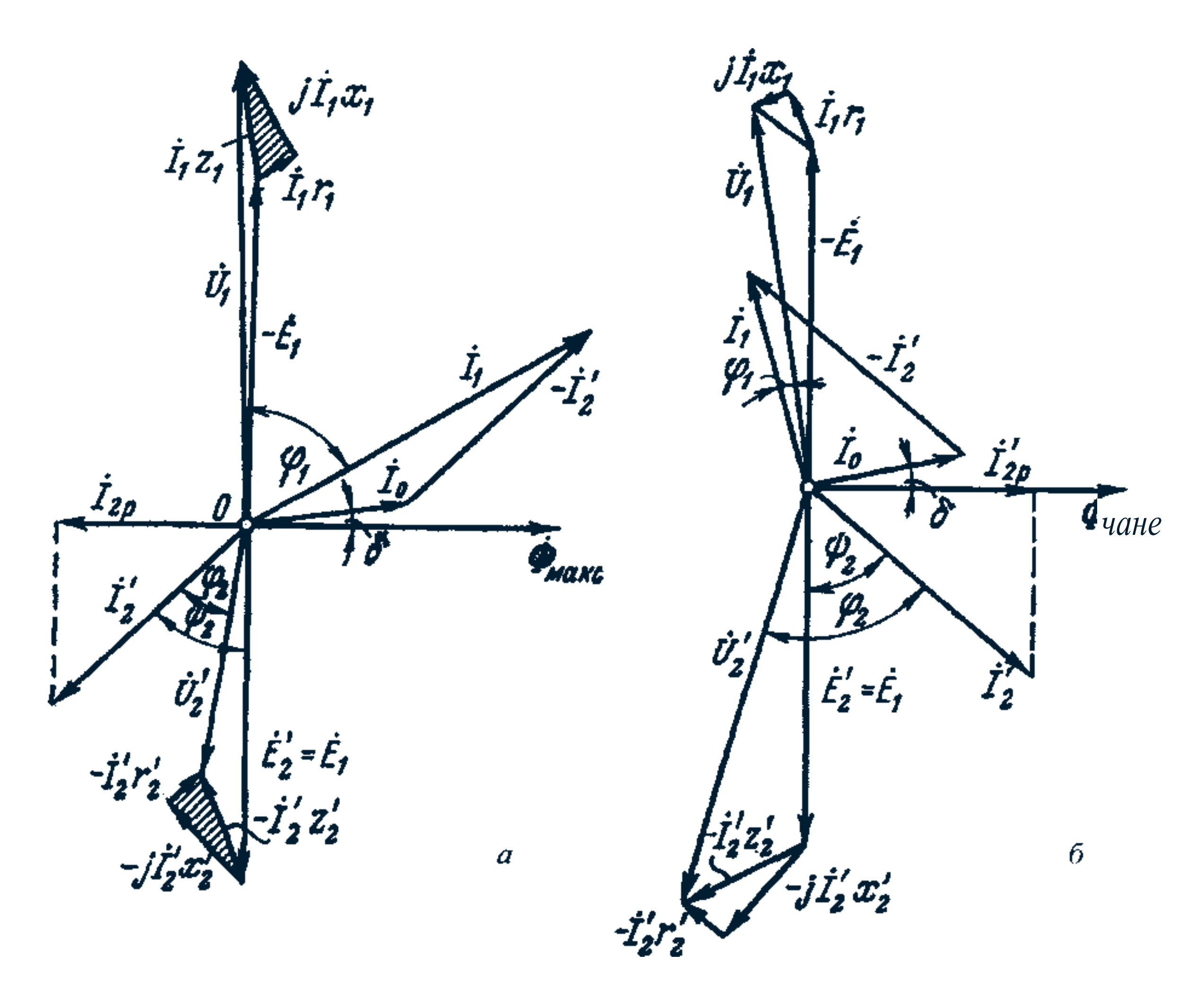


Рис. 15. Векторные диаграммы трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

падение напряжения рассеяния во вторичной обмотке частично компенсируют друг друга. В результате напряжение $\dot{U}'_2$ может оказаться больше, чем ЭДС $\dot{E}'_2$. Кроме того, реактивная (опережающая) составляющая вторичного тока $I'_{2p} = I'_2 \sin\psi_2$ совпадает по фазе с реактивной составляющей тока холостого хода $\dot{I}_{0p}$, т. е. оказывает на магнитопровод трансформатора подмагничивающее действие.

Это ведет к уменьшению первичного тока $\dot{I}_1$ по сравнению с его величиной при активно-индуктивной нагрузке, когда составляющая $\dot{I}'_{2p}$ оказывает размагничивающее влияние (рис. 15, а).

7. Трехфазный трансформатор

Рис. 16. Трансформаторная группа (а) и трехфазный трансформатор (б)

Трансформирование трехфазной системы напряжений можно осуществить тремя однофазными трансформаторами, соединенными в трансформаторную группу (рис. 16, а). Однако относительная громоздкость, большой вес и повышенная стоимость являются недостатками трансформаторной группы, поэтому она применяется только в установках большой мощности с целью уменьшения веса и габаритов единицы оборудования, что важно при его монтаже и транспортировке.

В установках мощностью примерно до 60 000 кВ . А обычно применяют трехфазные трансформаторы (рис. 16, б), у которых обмотки расположены на трех стержнях, объединенных в общий магнитопровод двумя ярмами. Но полученный таким образом магнитопровод является несимметричным: магнитное сопротивление потоку средней фазы *Ф^* меньше магнитного сопротивления потокам крайних фаз $Ф_A$ и $Ф_c$ (рис. 17, а).

Так как к первичным обмоткам трехфазного трансформатора подводит-

ся симметричная система напряжений U_A, $U_в$ и *U^*, то в магнитопроводе трансформатора возникают магнитные потоки $Ф_A$, $Ф_в$ и $Ф_c$, образующие также симметричную систему (рис. 17, б) Однако вследствие магнитной несимметрии магнитопровода намагничивающие токи отдельных фазовых обмоток не равны: намагничивающие токи обмоток крайних фаз *(1$*$_A$ и Л)г) больше тока обмотки средней фазы *(!QQ)*. Кроме того, токи IQ_A и /0(~ оказываются сдвинутыми по фазе относительно соответствующих потоков $Ф_A$ и $Ф_c$ на угол *a*. Таким образом, при симметричной системе трехфазного напряжения, подведенного к трансформатору, токи холостого хода образуют несимметричную систему (рис. *11,в)*.

Для уменьшения магнитной несимметрии трехстержневого магнитопровода, т. е. уменьшения магнитного сопротивления потокам крайних фаз сечение ярем делают на 10 -15% больше сечения стержней, что уменьшает их магнитное сопротивление. Несимметрия токов холостого хода трехстержневого трансформатора практически не отражается на работе трансформатора, так как даже при небольшой нагрузке незаметно различие в величинах ТОКОВ IQ_A , IQ_B И /Q£ .

В результате при симметричном питающем напряжении и равномерной трехфазной нагрузке все фазы трехфазного трансформатора, выполненного на трехстержневом магнитопроводе, находятся в одинаковых условиях. Поэтому рассмотренные выше уравнения ЭДС, НС и токов, а также схема замещения и векторные диаграммы могут быть использованы для исследования работы любой фазы трехфазного трансформатора.

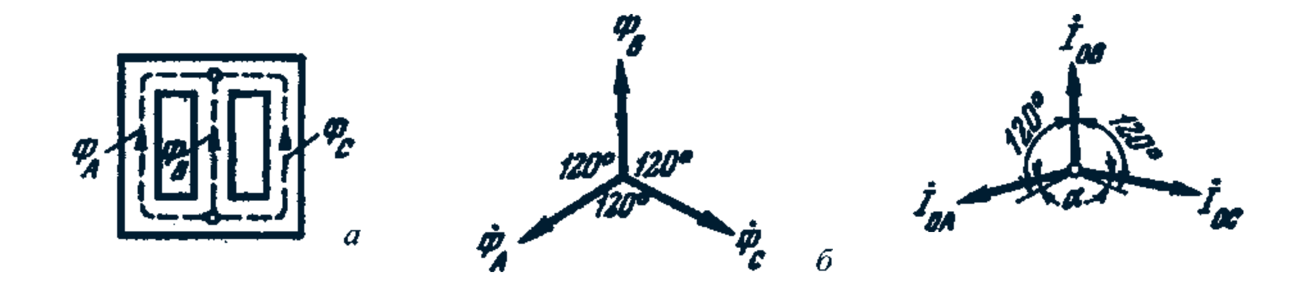


Рис. 17. Трехстержневой магнитопровод и векторные диаграммы

8. Схемы обмоток трехфазных трансформаторов и группы соединения

Обмотки трехфазных трансформаторов принято соединять по следующим схемам: в звезду, в звезду с нулевым выводом, в треугольник, в зигзаг с нулевым выводом. Схемы соединения обмоток трансформатора обозначают дробью, в числителе которой указана схема соединения обмоток *ВН*, *а* в знаменателе — обмоток *НН*. Например, *Y* / А означает, что обмотки *ВН* соединены в звезду, а обмотки *НН* — в треугольник.

Соединение в зигзаг применяют только в специализированных трансформаторах, например в трансформаторах для выпрямителей. Для выполнения соединения каждую фазу обмотки *НН* делят на две части, располагая их на разных стержнях. Указанные части обмоток соединяют так, чтобы конец одной части фазной обмотки был присоединен к концу другой части этой же обмотки, расположенной на другом стержне (рис. 18, а). *Зигзаг* называют *равноплечным*, если части обмоток, располагаемые на разных стержнях и соединяемые последовательно, одинаковы, *инеравноплечным*, если эти части неодинаковы. При соединении в зигзаг ЭДС отдельных частей обмоток геометрически вычитаются (рис. 18, б).

Рис. 18. Соединение в зигзаг

Выводы обмоток трансформаторов принято обозначать следующим образом: обмотки *ВН* — начала обмоток *А, В, С;* соответствующие концы *X, Y, Z;* обмотки *НН* — начала обмоток *а, в, с;* соответствующие концы *х, у, г.*

При соединении обмоток звездой линейное напряжение больше фазного ($U_л = \sqrt{3}U_Ф$), а при соединении обмоток треугольником линейное напряжение равно фазному ($U_л = U_Ф$). Из этого следует, что отношение линейных напряжений в трехфазном трансформаторе определяется не только отношением чисел витков фазных обмоток, но и схемой их соединения, как показано ниже:

Схема соединения обмоток	Y/Y	Δ/Y	Δ/Δ	Y/Δ
Отношение линейных напряжений	w_1/w_2	$w_1/(\sqrt{3}w_2)$	$w_1 = w_2$	$\sqrt{3}w_1/w_2$

До сих пор считали, что при построении векторных диаграмм ЭДС *EI* и *Ё2* совпадают по фазе. Но это соответствует действительности лишь при условии намотки первичной и вторичной катушек в одном направлении и одноименной маркировке выводов этих катушек, как показано на рис. 19, а.

Если же в трансформаторе изменить направление намотки катушки низшего напряжения или же переставить обозначения ее выводов, то ЭДС E_2 окажется сдвинутой по фазе относительно ЭДС *E* на 180° (рис. 19, б).

Сдвиг фаз между ЭДС *E* и E_2 принято выражать *группой соединения*. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0 до 360°, а кратность сдвига составляет 30°, то для обозначения группы соединения принят ряд чисел 1, 2, 3, 4,5,6,7,8,9, 10, 11 и 0.

Угол смещения векторов линейных ЭДС обмотки *НЕ* по отношению к векторам линейных ЭДС обмотки *ВН* определяется умножением числа, обозначающего группу соединения, на 30°. Угол смещения отсчитывают от вектора ЭДС обмотки *ВН* по часовой стрелке до одноименного вектора ЭДС обмотки *НН*. Например, группа соединения 5 указывает, что вектор ЭДС *НН* отстает по фазе от вектора ЭДС *ВН* на угол

5-30°-150°.

Рис. 19. Группы соединения однофазных трансформаторов: группа 1/1 - о (а), - группа 1/1 - 6 (б)

Иногда для лучшего понимания принятого обозначения групп соединения пользуются сравнением с часами. При этом вектор ЭДС обмотки высшего напряжения соответствует минутной стрелке, установленной на цифре 12, а вектор ЭДС обмотки низшего напряжения — часовой стрелке (рис. 20). При этом необходимо иметь в виду, что совпадение по фазе векторов ЭДС *EI* и E_2, эквивалентное совпадению стрелок часов на циферблате, обозначается группой 0 (а не 12).

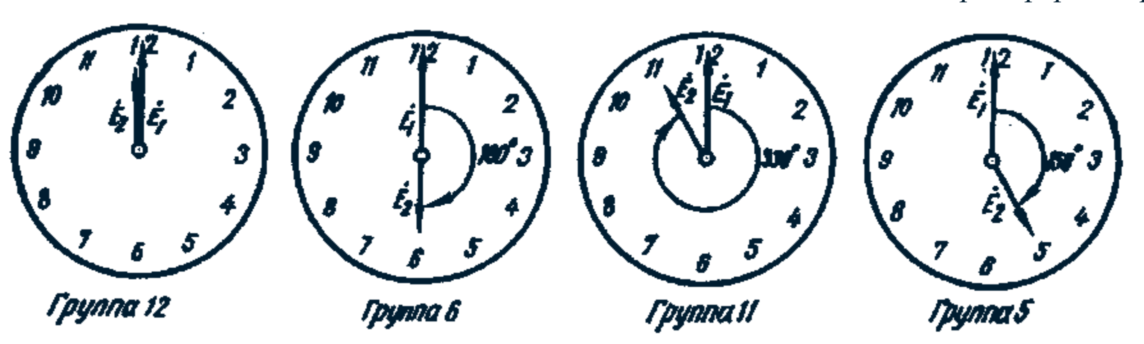


Рис. 20. Сравнение положения стрелок часов с обозначением группы соединения

Таким образом, в однофазном трансформаторе можно получить только две группы соединения: группу 0, соответствующую совпадению по фазе $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$, и группу 6, соответствующую сдвигу фаз между $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ на 180°. Из этих групп предусматривают лишь группу 0, она обозначается I / I - 0.

Применением разных способов соединения обмоток в трехфазных трансформаторах можно создать двенадцать различных групп соединения. Рассмотрим в качестве примера схему соединений «звезда — звезда» (рис. 21, а). Векторные диаграммы ЭДС показывают, что сдвиг между линейными ЭДС $\dot{E}_1(AB)$ и $\dot{E}_2(ab)$ в данном случае равен нулю. В этом можно убедиться, совместив точки A и a при наложении векторных диаграмм ЭДС обмоток BH и HH.

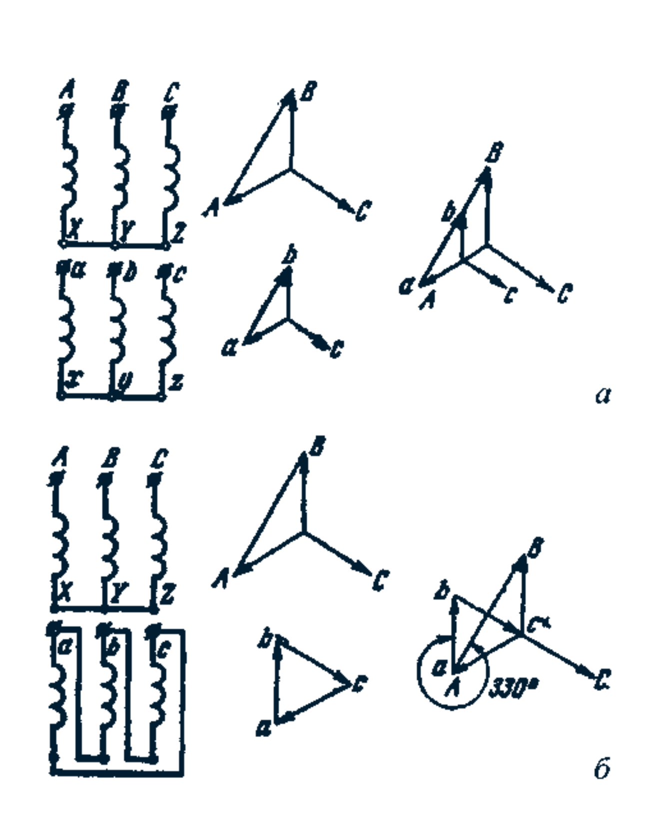


Рис. 21. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы для групп соединения: Y / Y - 0 (а); Y / Δ - 11 (б)

Следовательно, при указанных схемах соединения обмоток имеет место группа 0; обозначается Y / Y - 0. Если же на стороне HH в нулевую точку соединить зажимы a, b и c, а снимать ЭДС с зажимов x, y и z, то ЭДС $\dot{E}_2(ab)$ изменит фазу на 180°, и

трансформатор будет принадлежать группе 6 (Y / Y - 6).

При соединении обмоток «звезда — треугольник», показанном на рис. 21, б, имеет место группа 11 (Y / Δ - 11). Если же поменять местами начала и концы фазных обмоток *НН*, то вектор $\dot{E}_2(ab)$ повернется на 180°, и трансформатор будет относиться к группе 5 (Y / Δ - 5).

Рассмотренные четыре группы соединения (0, 6, 11 и 5) являются основными. Каждая из этих групп путем круговой перемаркировки выводов без изменения схем соединений образует по две производные группы: от группы 0 производными являются 4-я и 8-я, от группы 6 — 10-я и 2-я, от группы 11 — 3-я, 7-я, от группы 5 — 9-я и 1-я.

Основные группы соединения имеют некоторое преимущество перед производными, так как предусматривают одноименную маркировку выводов обмоток, расположенных на одном стержне. Это уменьшает вероятность ошибочных присоединений, однако не все группы соединения имеют практическое применение в трехфазных трансформаторах.

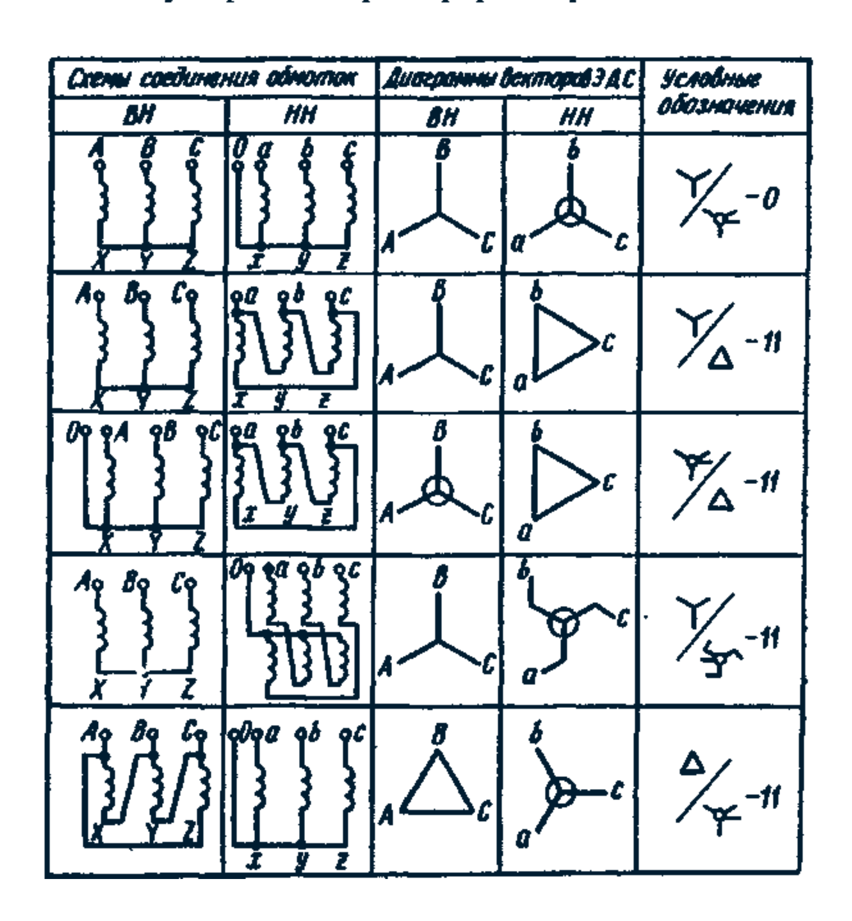


Рис. 22. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов

Схемы и группы соединения, применяемые для силовых двухобмоточных трансформаторов общепромышленного назначения показаны на рис. 22.

Путем соединения обмотки *НН* в зигзаг в сочетании с соединением обмотки *ВН* в звезду или треугольник можно получить практически любой угол сдвига фаз между ЭДС обмоток *ВН* и *НН*. Этого достигают разделением обмотки *НН* на две части с различным соотношением витков в этих частях, а следовательно, и с различным значением угла */З* (см. рис. 18, б).

9. Явления, возникающие при намагничивании магнитопроводов трансформаторов

Допустим, что к первичной обмотке трансформатора подведено синусоидальное напряжение. При этом поток в магнитопроводе также будет синусоидальным: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$.

Однако вследствие магнитного насыщения магнитный поток трансформатора непропорционален намагничивающему току. Поэтому при синусоидальном потоке Φ намагничивающий ток i_{0p} является несинусоидальным. Для определения формы кривой этого тока $i_{0p} = f(t)$ воспользуемся кривой намагничивания магнитопровода $\Phi = f(i_{0p})$ и графиком изменения потока $\Phi = f(t)$.

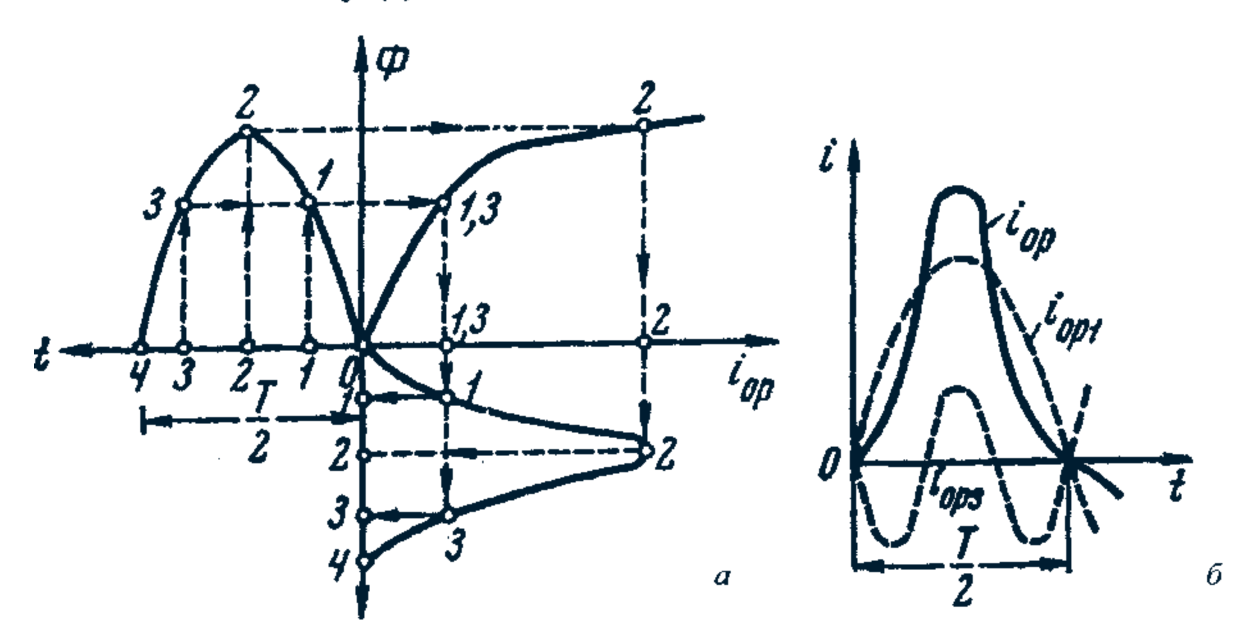


Рис. 23. Построение кривой намагничивающего тока (а) и разложение ее на составляющие (б)

На рис. 23, а дано построение графика намагничивающего тока /О = /ХО • Здесь в левом верхнем квадранте показана синусоидальная кривая *Ф* = *f(f)*, а в верхнем правом квадранте — кривая намагничивания *Ф* = *f(JQp}* материала магнитопровода. Для получения графика намагничивающего тока холостого хода /Q_ = *f(t)*, расположенного в правом нижнем

квадранте, поступают следующим образом. На графике *Ф* — /ХО выбирают ряд точек *(1,2, 3)*, проектируют их на кривую намагничивания и определяют значения намагничивающего тока, соответствующие выбранным значениям магнитного потока. Затем проводят вертикальные линии через точки *1,2, 3 на* оси /on В правый нижний квадрант до пересечения с горизонтальными линиями, проведенными из точек 7,2,3 на оси времени этого квадранта, и получают геометрическое место точек кривой намагничивающего тока /0„ — *f(f)* • Из сделанных построений видно, что при синусоидальной форме

кривой *Ф* = /ХО намагничивающий ток имеет пикообразную форму. В целях упрощения построений в этом случае воспользовались кривой намагничивания *Ф* = /Х/оп), построенной без учета гистерезиса.

После разложения кривой тока $/_0$ „ на составляющие (рис. 23, б) видно, что в этом токе,кроме основной (первой) гармоники /о„рярко выражена третья /001- Так, в трансформаторе с магнитопроводом из высоколегированной

стали при индукции *В = 1,4* Тл третья гармоника составляет примерно 30% основной гармоники намагничивающего тока. Сказанное относится лишь к реактивной составляющей тока холостого хода, так как активная составляющая /од является синусоидальной. Но $/_{Oa}$ обычно не превышает 10% от тока холостого хода, поэтому с некоторым принижением можно принять, что кривая тока холостого хода не отличается от кривой $/_0$„.

10. Влияние схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов на их работу в режиме холостого хода

Из уравнений токов третьей гармоники в трехфазной системе :

$$\left.\begin{aligned} i_{A3} &= I_{3макс}\sin 3\omega t; \\ i_{B3} &= I_{3макс}\sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{3макс}\sin 3\omega t; \\ i_{C3} &= I_{3макс}\sin 3(\omega t + 120^\circ) = I_{3макс}\sin 3\omega t \end{aligned}\right\} \qquad (29)$$

видно, что эти токи совпадают по фазе, т. е. в любой момент времени они имеют одинаковое направление. Это обстоятельство оказывает существенное влияние на процессы, сопровождающие намагничивание сердечников при трансформировании трехфазного тока.

Рассмотрим особенности режима холостого хода трехфазных трансформаторов при некоторых схемах соединения обмоток (рис. 22).

Соединение «звезда - звезда с нулевым выводом». При соединении первичных обмоток трехфазного трехстержневого магнитопровода звездой без нулевого вывода в фазных обмотках токи третьей гармоники отсутствуют, так как они, совпадая во времени, взаимно уравновешиваются (рис. 24, а). При этом намагничивающий ток становится синусоидальным, а магнитный поток приобретает несинусоидальную (уплощенную) форму с явно выраженной третьей гармонической $Ф_3$, (рис. 25).

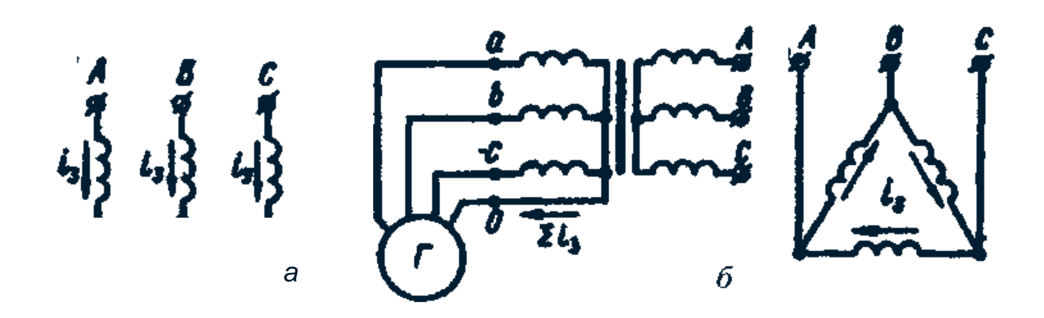


Рис. 24. Направление токов третьей гармоники при различных схемах соединения обмоток

Потоки третьей гармоники не могут замкнуться в трехстержневом магнитопроводе, так как они совпадают по фазе, т. е. направлены встречно. Эти потоки замыкаются через воздух (масло) и металлические стенки бака (рис. 26). Большое магнитное сопротивление потоку $Ф_3$ ослабляет его величину, поэтому наводимые потоками $Ф_3$ в фазных обмотках ЭДС третьей гармоники невелики и обычно их амплитуда не превышает 5 - 7% от амплитуды основной гармоники. На практике поток $Ф_3$ учитывают лишь с точки зрения потерь от вихревых токов, индуктируемых этим потоком в стенках бака.

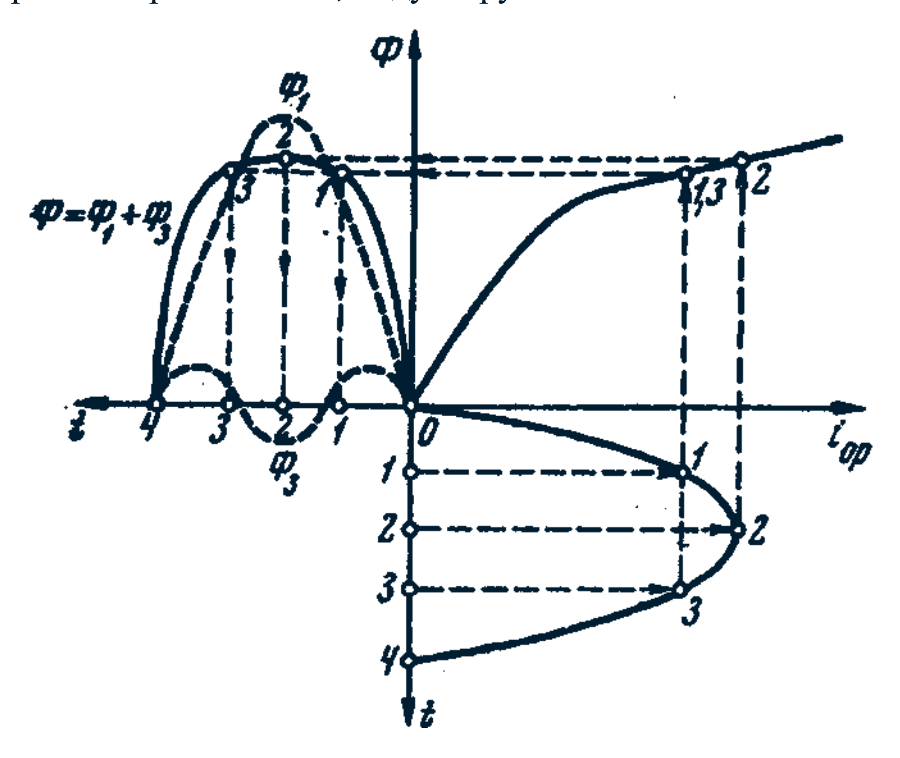


Рис. 25. Построение кривой магнитного потока при синусоидальной форме намагничивающего тока

Так, например, при индукции в стержне магнитопровода порядка 1,4 Тл потери от вихревых токов в баке составляют около 10% от потерь в магнитопроводе, а при индукции 1,6 Тл эти потери возрастают до 50—65%.

В случае трансформаторной группы, состоящей из трех однофазных трансформаторов (см. рис. 16, а), магнитопроводы отдельных фаз магнитно не связаны, поэтому магнитные потоки третьей гармоники всех трех фаз беспрепятственно замыкаются (поток каждой фазы замыкается в своем магнито-

проводе). При этом величина потока $Ф_3$ может достигать значений, равных 15—20% от $Ф_1$.

Несинусоидальный магнитный поток Ф\, содержащий, кроме основной гармоники Ф\, еще и третью $Ф_3$:

$$\Phi = \Phi_1 \sin\omega t + \Phi_3 \sin 3\omega t, \qquad (30)$$

наводит в фазных обмотках несинусоидальную ЭДС

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt} = \omega w\Phi_1 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 3\omega w\Phi_3 \sin\left(3\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = e_1 + e_3 \qquad (31)$$

Рис. 26. Пути замыкания магнитных потоков третьей гармоники в трехфазном трансформаторе

Повышенная частота (3d}) магнитного потока $Ф_3$ приводит к появлению значительной ЭДС e^, резко увеличивающей амплитудное значение фазной ЭДС обмотки при том же ее действующем значении, что создает неблагоприятные условия для электрической изоляции обмоток.

Амплитуда ЭДС третьей гармоники в трансформаторной группе может достигать 45—65% от амплитуды основной гармоники. Однако следует отметить, что линейные ЭДС (напряжения) остаются синусоидальными и не содержат третьей гармоники, так как при соединении обмоток в звезду фазные ЭДС $e^{\wedge}{}_A$, e-$\$_в$ и ^e3C совпадая по фазе, взаимно уравновешиваются.

Если первичная обмотка трансформатора является обмоткой *НН*, и ее нулевой вывод присоединен к нулевому выводу генератора (см. рис. 24, б), то намагничивающие токи фаз содержат третьи гармоники. Эти токи совпадают по фазе (29), а поэтому все они направлены либо от трансформатора к генератору, либо наоборот. В нулевом проводе будет протекать ток, равный $3/_3$. При этом магнитный поток трансформатора, а следовательно, и ЭДС в фазах будут синусоидальны.

Соединения, при которых обмотки какой-либо стороны трансформатора (НН или ВН) соединены в треугольник. Эти схемы соединения наиболее желательны, так как они не имеют недостатков, рассмотренных ранее схем.

Допустим, что в треугольник соединены первичные обмотки трансформатора. Тогда ток третьей гармоники беспрепятственно замыкается в замкнутом контуре фазных обмоток (см. рис. 24, в). Но если намагничивающий ток содержит третью гармонику, то магнитные потоки в стержнях, а следовательно, и ЭДС в фазах практически синусоидальны.

Если же в треугольник соединены вторичные обмотки трансформатора, а первичные соединены в звезду, то ЭДС третьей гармоники, наведенные во вторичных обмотках, создают в замкнутом контуре треугольника ток третьей гармоники. Этот ток создает в магнитопроводе магнитные потоки третьей гармоники Ф23' направленные встречно потокам третьей гармоники от намагничивающего тока $Ф_{13}$ (по правилу Ленца — индуцированный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле уменьшает (компенсирует) изменение магнитного потока, являющегося причиной возникновения этого тока). В итоге результирующий поток третьей гармоники *Фрез3* *=Ф\2>~^~Ф23>* значительно ослабляется и практически не влияет на свойства трансформаторов.

11. Параметры и характеристики трансформаторов

Предварительные замечания

Полученная ранее электрическая схема замещения (см. рис. 14, б) позволяет с достаточной точностью исследовать свойства трансформаторов в любом режиме. Использование этой схемы для определения характеристик имеет наибольшее практическое значение для трансформаторов мощностью 50 кВ . А и выше, так как исследование таких трансформаторов методом непосредственной нагрузки связано с некоторыми техническими трудностями: непроизводительный расход электроэнергии, необходимость в громоздких и дорогостоящих нагрузочных устройствах. Определение параметров схемы замещения Zj = /j + *jx*\; $Z_m = r_m + jx_m$; Z^ = *r*^ + *jx'*^ возможно либо расчетным путём (в процессе расчета трансформатора), либо опытным. Ниже излагается порядок определения параметров схемы замещения трансформатора опытным путем, сущность которого состоит в проведении двух опытов — холостого хода и короткого замыкания.

11.1. Опыт холостого хода

Холостым ходом называют режим работы трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке ($z_н = \infty, I_2 = 0$). В этом случае уравнения ЭДС и токов (27) принимают вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 jx_1 + \dot{I}_0 r_1; \quad \dot{U}'_{20} = \dot{E}'_2; \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0. \qquad (32)$$

Так как полезная мощность при работе трансформатора вхолостую равна нулю, мощность на входе трансформатора в режиме холостого хода P_0 расходуется на магнитные потери в магнитопроводе $P_М$ и электрические потери в меди одной лишь первичной обмотки ($I_0^2 r_1$). Однако ввиду небольшой величины тока I_0, который обычно не превышает 2—10% от $I_{1ном}$, электрическими потерями $I_0^2 r_1$ можно пренебречь и считать, что вся мощность холостого хода представляет собой мощность магнитных потерь в стали магнитопровода. Поэтому магнитные потери в трансформаторе принято называть *потерями холостого хода.*

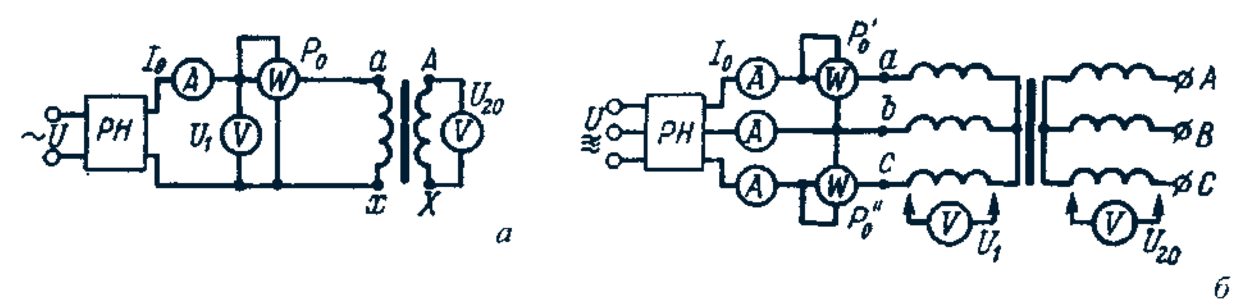


Рис. 27. Схема опыта холостого хода: однофазный трансформатор (а); трехфазный трансформатор (б)

Опыт холостого хода проводят по схеме, изображенной на рис. 27,а. Комплект электроизмерительных приборов, включенных в схему, дает возможность непосредственно измерить: напряжение t/j, подведенное к первичной обмотке; напряжение £/20на вторичной обмотке; мощность холостого хода/о и ток холостого хода $/_0$.

Обычно напряжение к первичной обмотке трансформатора при эксперименте подводят через регулятор напряжения *РН*, позволяющий постепенно

повышать напряжение от $0{,}5U_{1ном}$ до $,1U_{1ном}$. При этом через определенные интервалы этого напряжения снимают показания приборов, а затем строят характеристики холостого хода, представляющие собой зависимости тока I_0, мощности P_0 и коэффициента $\cos\varphi_0$ от первичного напряжения (рис.28).

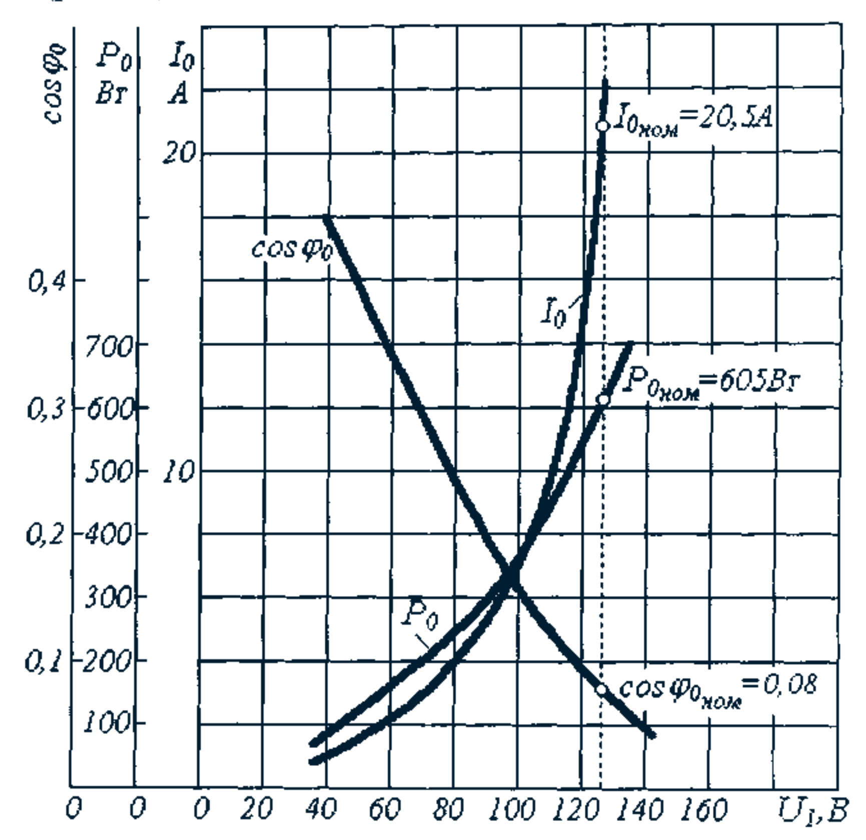


Рис. 28. Характеристики холостого хода трехфазного трансформатора

В случае трехфазного трансформатора характеристики холостого хода строят по средним (фазным) значениям тока и напряжения для трёх фаз:

$$I_0 = (I_{0a} + I_{0b} + I_{0c})/3, \tag{33}$$

$$U_1 = (U_{1a} + U_{1b} + U_{1c})/3, \tag{34}$$

для трехфазного трансформатора

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0' + P_0''}{3U_1 I_0} = \frac{P_0}{3U_1 I_0}, \tag{35}$$

где P_0' и P_0'' - показания однофазных ваттметров; U_1 и I_0 - фазные значения напряжения и тока.

По данным опыта холостого хода можно определить коэффициент трансформации $k = U_1 / U_{20} = w_1 / w_2$; ток холостого хода $I_{0ном}$ при $U_{1ном}$, обычно выражающегося в процентах от номинального первичного тока, потери холостого хода P_0

$$i_0 = \left(I_{0ном} / I_{2ном}\right)100\% \qquad (36)$$



$$P_0 = I_0^2\left(r_1 + r_m\right) \qquad (37)$$

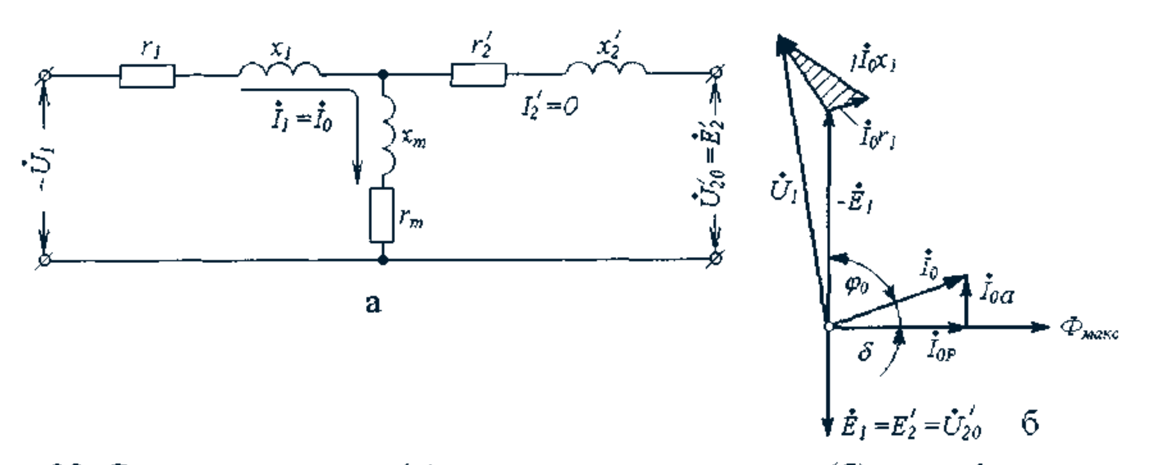


Рис. 29. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) трансформатора в режиме холостого хода

В трехфазном трансформаторе токи холостого хода в фазах неодинаковы (по причине магнитной несимметрии) и образуют несимметричную систему, поэтому мощность P_0 следует измерять двумя ваттметрами по схеме, изображенной на рис. 27, б. Падение напряжения в первичной ветви схемы замещения в режиме холостого хода $I_0\left(r_1 + jx_1\right)$ (рис. 29) составляет весьма незначительную величину, поэтому, не допуская заметной ошибки, можно пользоваться следующими выражениями для расчета параметров ветви намагничивания:

$$z_m = U_1 / I_0; \quad r_m = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2}\,. \qquad (38)$$

11.2. Опыт короткого замыкания

Короткое замыкание трансформатора — это такой режим, когда вторичная обмотка замкнута накоротко (Z_H = 0), при этом вторичное напряжение (t/2 — 0). В условиях эксплуатации, когда к трансформатору подведено номинальное напряжение *U\НОМ*, короткое замыкание является аварийным режимом и представляет большую опасность для трансформатора.

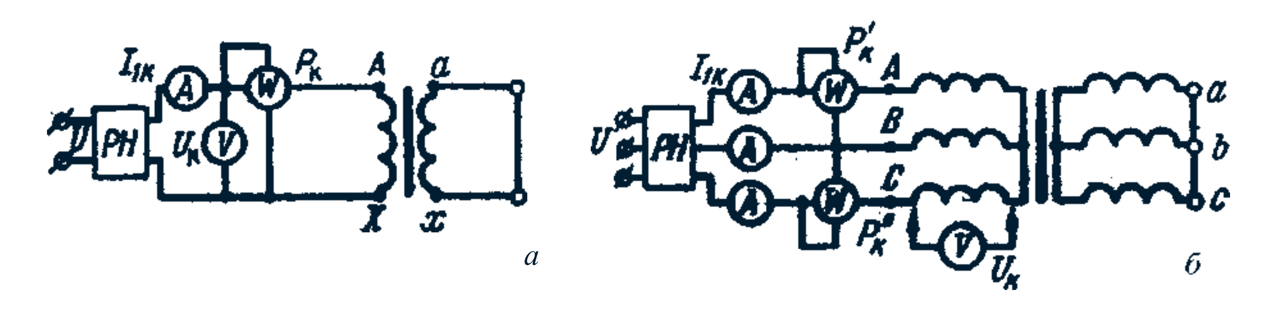


Рис. 30. Схема опыта КЗ: однофазный трансформатор (а), трехфазный трансформатор (б)

Опыт КЗ имеет практическое значение тогда, когда вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко (рис. 30), а к первичной обмотке подводят пониженное напряжение, постепенно повышая его регулятором напряжения *РН* до некоторого значения $U_{К\ НОМ}$, при котором токи КЗ в обмотках трансформатора становятся равными номинальным токам:

Лк = Лион и ^2к = ^2ном- В этом случае снимают показания приборов и строят характеристики КЗ: /1К, $COS(p_K$, P_K в зависимости от U_K (рис. 31). В случае трехфазного трансформатора значения фазных напряжений и токов будут средними для трех фаз:

Рис. 3 1 . Характеристика КЗ трехфазного трансформатора

$$U_к = \frac{U_{кA} + U_{кB} + U_{кC}}{3}; \quad (39)$$

$$I_{1к} = \frac{I_{кA} + I_{кB} + I_{кC}}{3}. \quad (40)$$

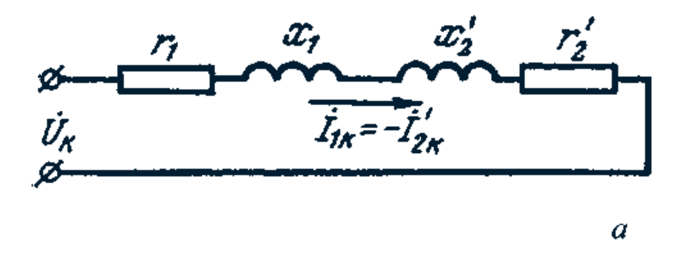
По этим значениям измеренных величин определяют

$$\cos\varphi_к = \frac{P'_к + P_к}{3U_к I_{1к}} = \frac{P_к}{3U_к I_{1к}}. \quad (41)$$

Напряжение, при котором токи в обмотках короткозамкнутого трансформатора равны номинальным, называют *номинальным напряжением короткого замыкания* и обычно выражают в процентах:

$$u_к = (U_к / U_{1ном})100\% \quad (42)$$

Для силовых трансформаторов $u_к$ = 5 - 10% от номинального первичного напряжения.



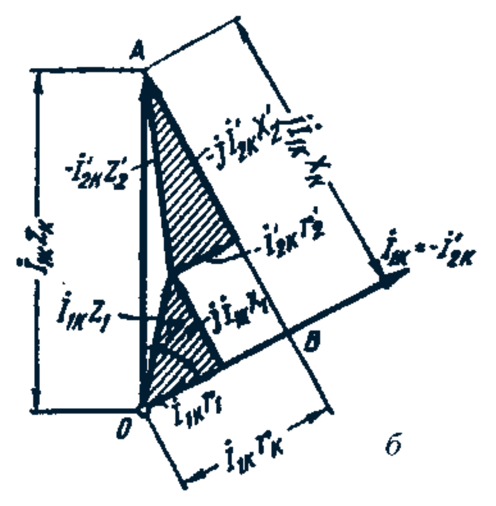


Рис. 32. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) трансформатора в режиме КЗ

Как следует из (24), магнитный поток в магнитопроводе трансформатора пропорционален первичному напряжению U_1. Но так как это на-

пряжение при опыте КЗ составляет не более 10% от $U_{1ном}$, то такую же небольшую величину составляет магнитный поток. Для создания такого магнитного потока требуется настолько малый намагничивающий ток, что величиной его можно пренебречь. В этом случае уравнение токов (27) принимает вид

$$I_{1к} = -I'_{2к}, \quad (43)$$

а схема замещения трансформатора для опыта КЗ не содержит ветви намагничивания (рис. 32, а). Для этой схемы замещения можно записать уравнение ЭДС

$$\dot{U}_к = \dot{I}_{1к}(r_1 + r'_2) + j\dot{I}_{1к}(x_1 + x'_2), \quad (44)$$

или

$$\dot{U}_к = \dot{I}_{1к} r_к + j\dot{I}_{1к} x_к = \dot{I}_{1к} Z_к \;, \quad (45)$$

где $Z_к$ — сопротивление трансформатора при опыте КЗ

$$Z_к = r_к + jx_к; \quad (46)$$

$r_к$ и $x_к$ активное и индуктивное сопротивления трансформатора при опыте короткого замыкания.

Воспользовавшись уравнениями токов (43) и для ЭДС (44), для опыта КЗ построим векторную диаграмму трансформатора при КЗ (рис. 32). Построение диаграммы начнём с вектора $U_K = \dot{I}_{1K} Z_K$. Затем под углом φ_K к вектору U_K проводим вектор токов $\dot{I}_{1K} = -\dot{I}'_{2K}$. Построив векторы падений напряжения в первичной $I_{1K} r_1$ и $jI_{1K} x_1$ и во вторичной $-I'_{2K} r'_2$ и $-jI'_{2K} x'_2$ обмотках, получим прямоугольник треугольник *AOB*, который называют *треугольником короткого замыкания*. Стороны этого треугольника:

$$\overline{OB} = \dot{I}_{1K} r_1 + \dot{I}'_{2K} r'_2 = \dot{I}_{1K} r_K = \dot{U}_{к.а};$$
$$\overline{BA} = \dot{I}_{1K} x_1 + \dot{I}'_{2K} x'_2 = \dot{I}_{1K} x_K = \dot{U}_{к.р};$$
$$\overline{OA} = \dot{I}_{1K} Z_K = \dot{U}_к.$$

Здесь $\dot{U}_{к.а}$ и $\dot{U}_{к.р}$ — активная и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$U_к = \sqrt{U^2{}_{к.а} + U^2{}_{к.р}} \quad . \qquad (47)$$

Параметры схемы замещения при опыте КЗ определяют по формулам:

$$z_к = U_к / I_{1к}; \; r_к = z_к \cos\varphi_к; \; x_к = \sqrt{z^2{}_к - r^2{}_к} \quad . \qquad (48)$$

Полученные значения сопротивлений $r_к$ и $z_к$, а также коэффициент мощности $\cos\varphi_к$ и напряжение КЗ $u_к$ приводят к рабочей температуре обмоток (+75 °C):

$$\left.\begin{aligned} r_{к75} &= r_к[1+\alpha(75^\circ - t_1)]; \quad z_{к75} = \sqrt{r^2_{к75} + x^2_к}; \\ \cos\varphi_{к75} &= r_{к75} / z_{к75}; \quad u_{r75} = (I_{1ном} z_{к75} / U_{1ном})100 \end{aligned}\right\}, \qquad (49)$$

где t_1 — температура обмоток во время опыта.

Так как при опыте КЗ основной поток Φ_m составляет всего лишь несколько процентов по сравнению с его значением при номинальном первичном напряжении, то величиной магнитных потерь, связанных с этим потоком, можно пренебречь. Следовательно, можно считать, что мощность $P_к$, потребляемая трансформатором при опыте КЗ, идет полностью на покрытие электрических потерь в обмотках трансформатора:

$$P_к = I^2_{1к} r_1 + I^2_{1к} r'_2 = I^2_{1к} r_к. \qquad (50)$$

11.3. Упрощенная векторная диаграмма трансформатора

Векторная диаграмма нагруженного трансформатора (рис. 15) наглядно показывает соотношение между параметрами трансформатора. Ввиду своей сложности эта диаграмма не может быть использована для практических расчетов. С целью упрощения диаграммы и придания ей практического значения

в силовых трансформаторах, работающих с нагрузкой, близкой к номинальной, пренебрегают током холостого хода и считают, что $I_1 = -I'_2$. Полученная в этом случае ошибка вполне допустима, так как ток I_0 по сравнению с токами I_1 и I'_2 невелик. При сделанном допущении схема замещения трансформатора приобретает упрощенный вид, так как не имеет ветви намагничивания и состоит только из последовательных участков $r_к = r_1 + r'_2$ и $x_к = x_1 + x'_2$ (рис. 33, а).

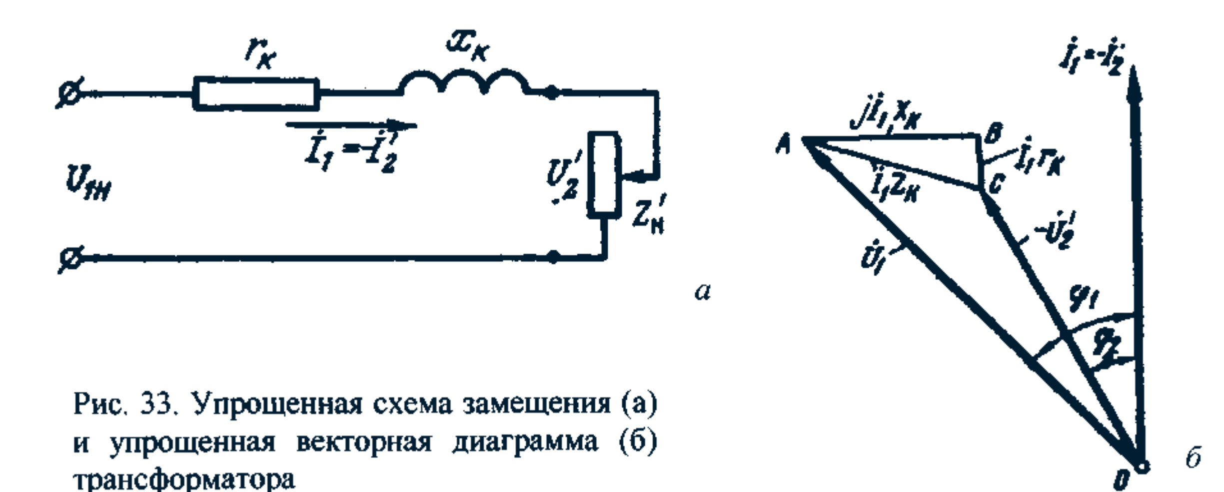


Рис. 33. Упрощенная схема замещения (а) и упрощенная векторная диаграмма (б) трансформатора

Соответственно упрощенной схеме замещения построена и упрощенная векторная диаграмма (рис. 33, б), в которой прямоугольный треугольник *ABC* представляет собой треугольник короткого замыкания:

$$\overline{BC} = \dot{I}_1 r_к; \quad \overline{CA} = I_1 Z_к; \quad \overline{AB} = I_1 x_к. \tag{51}$$

Упрощенная векторная диаграмма строится по заданным $U_1; I_1$; $\cos\varphi_2 = r'_н / z'_н$ параметрам треугольника короткого замыкания $U_к$; $U_{к.а}$; $U_{к.р.}$.

Порядок построения диаграммы следующий (рис. 34). Из точки *O* радиусом $\overline{OA} = U_1$ проводим окружность U_1, затем из точки *O* проводим луч $-U_2$ под углом φ_2 к оси ординат. Треугольник

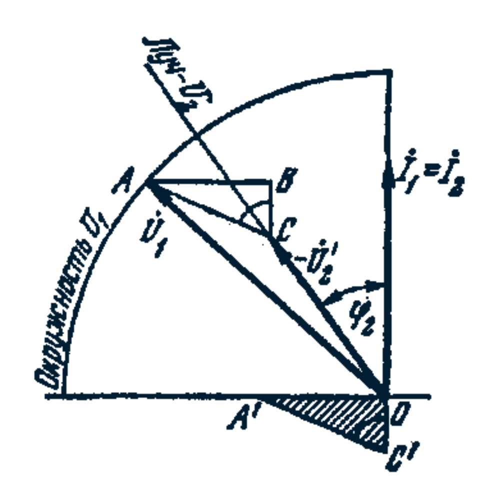


Рис. 34. Построение упрощенной векторной диаграммы трансформатора

КЗ пристраиваем к оси абсцисс (треугольник $OA'\,C'$) Затем сторону этого треугольника $A'C'$ переносим параллельно самой себе так, чтобы один ее конец касался окружности U_1 (точка A), а другой — луча $-U_2'$ (точка C). Тогда, проведя OA, получаем вектор, $\dot{U}_1$, а отрезок OC дает вектор $-\dot{U}_2'$. После этого к стороне треугольника AC пристраиваем другие его стороны CB и BA.

11.4. Изменение вторичного напряжения

При изменениях нагрузки трансформатора его вторичное напряжение $\dot{U}_2'$ меняется. В этом можно убедиться, воспользовавшись упрощенной схемой замещения трансформатора (рис. 33), из которой следует, что $\dot{U}_2' = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_к$. Изменение вторичного напряжения трансформатора при переходе от холостого хода до номинальной нагрузки является важнейшей характеристикой трансформатора и определяется выражением

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{1ном} - U_2'}{U_{1ном}} 100\% \qquad (52)$$

Для определения величины $\Delta U_{ном}$ воспользуемся упрощенной векторной диаграммой трансформатора, сделав на ней следующее дополнительное построение (рис. 35). Из точки A опустим перпендикуляр AD на продолжение вектора $-\dot{U}_2'$. С некоторым допущением будем считать, что отрезок BD представляет собой разность $U_{1ном} = U_2' = \overline{BD} = \overline{BF} + \overline{FD}$, где $\overline{BD} = U_{к.а}\cos\varphi_2$, $\overline{FD} = U_{к.р}\sin\varphi_2$, тогда

$$U_{1ном} - U_2' = U_{к.а.}\cos\varphi_2 + U_{к.р.}\sin\varphi_2 \qquad (53а)$$

Изменение вторичного напряжения (52)

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{к.а.}\cos\varphi_2 + U_{к.р.}\sin\varphi_2}{U_{1ном}} 100 \qquad (53б)$$

Обозначим $(U_{к.а}/U_{1ном})100 = u_{к.а.}$; $(U_{к.р}/U_{1ном})100 = u_{к.р.}$, тогда (53б) принимает вид

$$\Delta U_{ном} = u_{к.а.}\cos\varphi_2 + u_{к.р.}\sin\varphi_2 \quad (54)$$

Формула (54) дает возможность определить ΔU лишь при номинальной нагрузке трансформатора. При необходимости расчета величины изменения вторичного напряжения при любой нагрузке в (54) следует ввести коэффициент нагрузки $\beta = I_2 / I_{2ном}$.

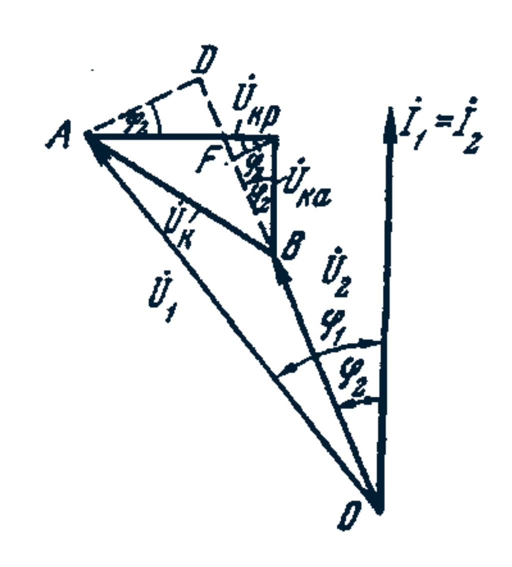


Рис. 35. К выводу формулы $\Delta U_{ном}$

$$\Delta U_{ном} = \beta(u_{к.а.}\cos\varphi_2 + u_{к.р.}\sin\varphi_2) \quad (55)$$

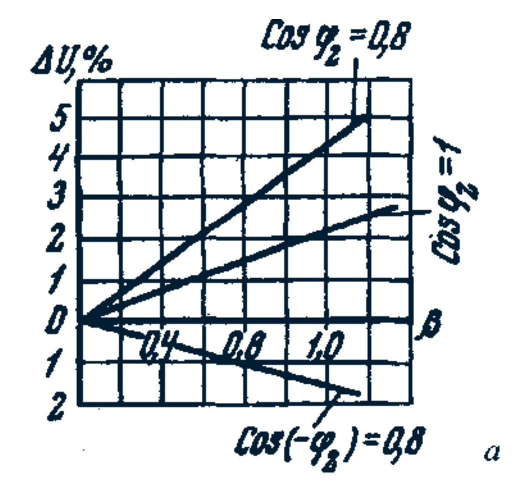
Выражение (55) показывает зависимость ΔU не только от характера, но и от величины нагрузки.

На рис. 36, а представлен график зависимости $\Delta U = f(\beta)$ при $\cos\varphi_2$=const, а на рис. 36, б — график $\Delta U = f(\cos\varphi_2)$ при β = const. На этих графиках отрицательные значения ΔU при работе трансформатора с емкостной нагрузкой соответствуют повышению напряжения при переходе от холостого хода к нагрузке. Имея в виду, что $u_{к.а} = u_к \cos\varphi_к$, $u_{к.р} = u_к \sin\varphi_к$, получим еще одно выражение для расчета изменения вторичного напряжения при любой нагрузке:

$$\Delta U_{ном} = \beta(\cos\varphi_к \cos\varphi_2 + \sin\varphi_к \sin\varphi_2)\cdot u_к \quad (56)$$

Наибольшей величины ΔU достигает при $\cos\varphi_2 = \cos\varphi_к$.

Зависимость вторичного напряжения U_2 трансформатора от нагрузки I_2 называют ***внешней характеристикой***. Напомним, что в силовых трансформаторах за номинальное вторичное напряжение принимают напряжение



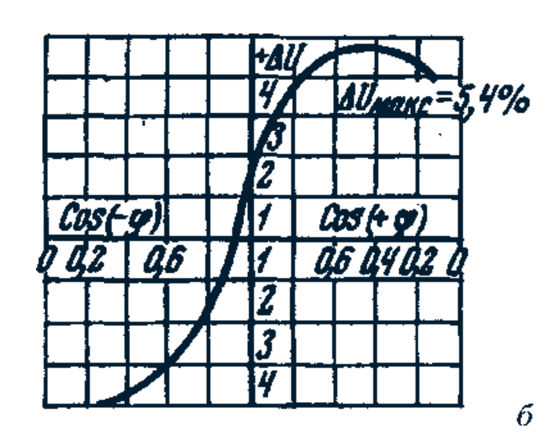


Рис. 36. Зависимость АС/ от величины нагрузки (а) и коэффициента мощности нагрузки (б) трансформатора

на зажимах вторичной обмотки при холостом ходу и номинальном первичном напряжении.

Вид внешней характеристики (рис. 37) зависит от характера нагрузки трансформатора (COS^$_2$)- Внешняя характеристика трансформатора может быть построена путем расчета АС/ для разных значений /? и COS$>$_2$ (56).

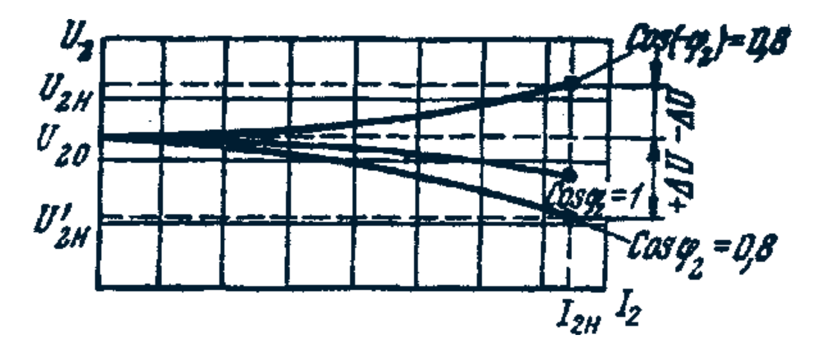


Рис. 37. Внешняя характеристика трансформатора

11.5. Потери и КПД трансформатора

В процессе передачи энергии от первичной обмотки ко вторичной активная мощность /j, поступающая из сети, частично расходуется на элек-

2

трические потери, связанные с нагревом первичной обмотки *Рэ\ = 1\ г*. Оставшаяся мощность посредством магнитного поля передается вторичной об-

мотке, частично расходуясь при этом на *магнитные* потери $P_м$, которые складываются из потерь на вихревые токи $P_{вх}$ и на перемагничивание (гистерезис) $P_г$. Величина этих потерь пропорциональна активной составляющей тока холостого хода $P_м = E_1 I_{0a}$. Оставшаяся после этого активная мощность полностью поступает во вторичную цепь и называется *электромагнитной* мощностью $P_{эм} = P_1 - P_{э1} - P_м = I'_2 E'_2 \cos\psi_2$. Полученная вторичной обмоткой мощность, частично истраченная на нагрев вторичной обмотки $P_{э2} = I'^2_2 r'_2$ (*электрические потери*), отдается трансформатором во вторичную цепь $P_2 = P_{эм} - P_{э2}$.

КПД трансформатора определяется отношением активных мощностей на выходе и входе трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{э1} + P_м + P_{э2}} = 1 - \frac{P_{э1} + P_м + P_{э2}}{P_2 + P_{э1} + P_м + P_{э2}}. \quad (57)$$

КПД трансформаторов выше, чем электрических машин, что частично объясняется отсутствием механических потерь. Даже в трансформаторах мощностью, измеряемой сотнями кВ · А, КПД достигает значений 98—99%. Поэтому определение КПД трансформаторов с достаточной точностью возможно лишь косвенным методом — путем определения потерь по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания. Метод непосредственного определения КПД путем измерения активных мощностей P_1 и P_2 дает значительную ошибку из-за погрешностей измерения.

Магнитные потери $P_м$ определяются мощностью холостого хода при номинальном подведенном напряжении $P_{0ном}$. Следует отметить, что магнитные потери меньше $P_{ном}$ на величину потерь на нагрев первичной обмотки в режиме холостого хода ($P_м = P_{0ном} - I^2_{0ном} r_1$). Однако значения $I_{0ном}$ обычно невелики, а поэтому величина $I^2_{0ном} r_1$ настолько мала по сравнению с $P_{0ном}$, что ею пренебрегают, считая $P_м = P_{0ном}$.

Магнитные потери зависят от частоты переменного тока ($P_м \equiv f^{1,3}$) и магнитной индукции ($P_м \equiv B^2$). При неизменном первичном напряжении

магнитные потери от нагрузки не зависят, а поэтому их называют *постоянными.*

Электрические потери, т.е. потери в обмотках трансформатора, связанные с их нагревом, называют *переменными,* так как величина этих потерь прямо пропорциональна квадрату тока в обмотках. Как установлено, величина электрических потерь принимается равной потерям КЗ:

$$P_э = P_{э1} + P_{э2} = I_{1к}^2 r_к = P_к \quad (58)$$

Если известна мощность $P_{к.ном}$ при номинальных токах, то электрические потери при любой нагрузке

$$P_э = \beta^2 P_{к.ном}, \quad (59)$$

где β - коэффициент нагрузки.

Суммарные потери в трансформаторе

$$\sum P = P_{э1} + P_м + P_{э2} = P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном} \quad (60)$$

Возвращаясь к (57), получим

$$\eta = 1 - \frac{P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}}{P_2 + P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}} \quad (61)$$

Активная мощность на выходе трансформатора

$$P_2 = mI_2U_2\cos\varphi_2 = \beta\, S_{ном}\cos\varphi_2, \quad (62)$$

где $S_{ном} = mI_{2ном}U_2$ — номинальная мощность трансформатора, В·А;

m — число фаз трансформатора.

В итоге получаем

$$\eta = 1 - \frac{P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}}{\beta\, S_{ном}\cos\varphi_2 + P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}} \quad (63)$$

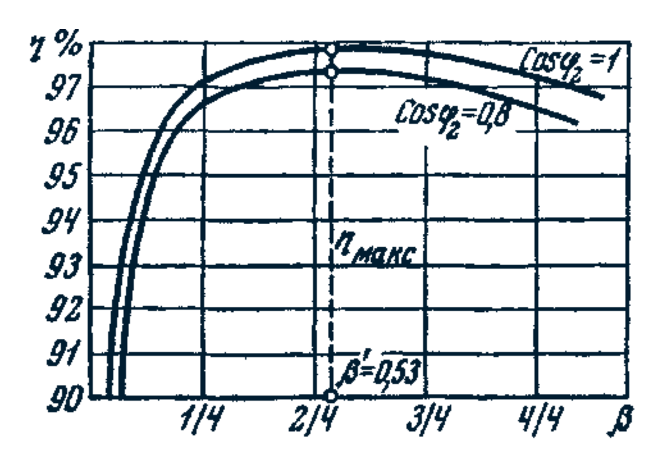


Рис. 38. График зависимости КПД трансформатора от нагрузки

Величина КПД трансформатора зависит от величины нагрузки (β) и ее характера ($\cos\varphi_2$) (рис. 38). Максимальное значение КПД соответствует такой нагрузке, при которой магнитные потери равны электрическим ($P_{0ном} = \beta^2 P_{к.ном}$). Отсюда значение коэффициента нагрузки, соответствующее максимальному КПД,

$$\beta = \sqrt{P_{0ном} / P_{к.ном}} \quad (64)$$

Обычно КПД имеет максимальное значение при $\beta = 0{,}5 \div 0{,}6$.

11.6. Параллельная работа трансформаторов

Параллельной работой двух или нескольких трансформаторов называется работа при параллельном соединении их обмоток как на первичной, так и на вторичной сторонах. При параллельном соединении одноименные зажимы трансформаторов присоединяют к одному и тому же проводу сети (рис. 39, *а*). Применение нескольких параллельно включенных трансформаторов вместо одного трансформатора суммарной мощности необходимо для обеспечения бесперебойного энергоснабжения в случае аварии в каком-либо трансформаторе или отключения его для ремонта.

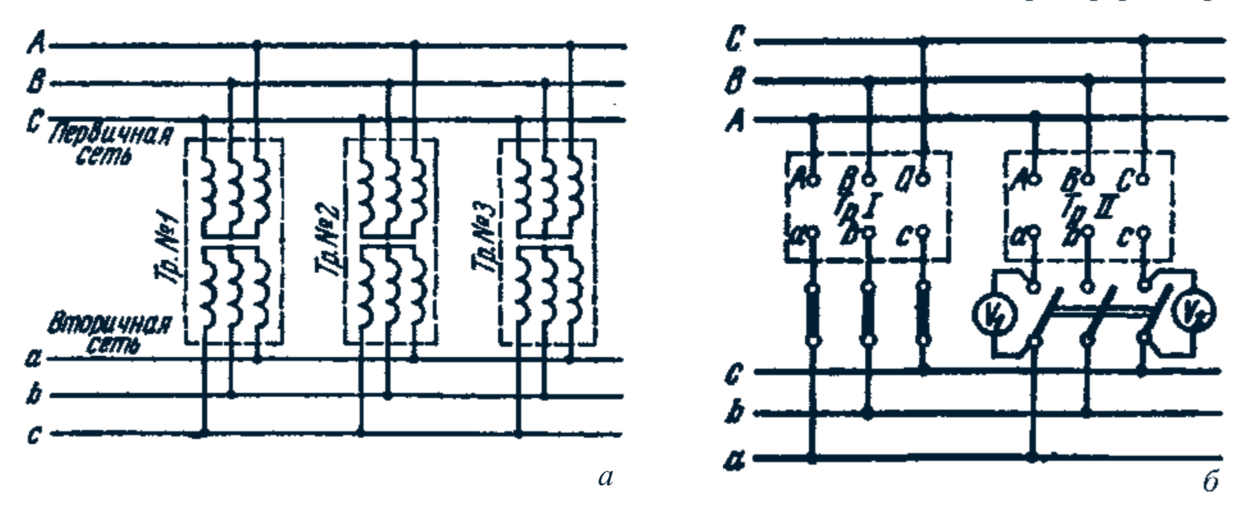


Рис. 39. Включение трансформаторов на параллельную работу

Это целесообразно при работе подстанции с переменным графиком нагрузки, например, когда мощность нагрузки значительно меняется в различные часы суток. В этом случае при уменьшении мощности нагрузки можно отключить один или несколько трансформаторов, для того чтобы нагрузка трансформаторов, оставшихся включенными, была близка к номинальной. В итоге эксплуатационные показатели работы трансформаторов (КПД и COS *(Р2*) будут достаточно высокими.

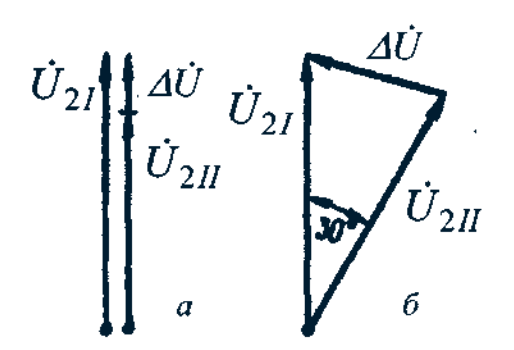


Рис. 40. Появление напряжения ΔU при несоблюдении условий включения трансформаторов на параллельную работу

Для того чтобы нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределялась пропорционально их номинальным мощностям, допускается параллельная работа двухобмоточных трансформаторов при следующих условиях:

1. При одинаковом первичном напряжении вторичные напряжения должны быть равны; другими словами, трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации: $k_I = k_{II} = k_{III} = \dots$

При несоблюдении этого условия, даже на холостом ходу, между параллельно включенными трансформаторами возникает уравнительный ток $I_{ур}$, обусловленный разностью вторичных напряжении ΔU (рис. 40, а)

$$I_{ур} = \Delta U / (Z_{кI} + Z_{кII}),$$

где $Z_{кI}$ и $Z_{кII}$ — внутренние сопротивления трансформаторов.

При нагрузке трансформаторов уравнительный ток накладывается на нагрузочный. При этом трансформатор с более высоким вторичным напряжением холостого хода (с меньшим коэффициентом трансформации) оказывается перегруженным, а трансформатор равной мощности, но с большим коэффициентом трансформации — недогруженным. Так как перегрузка трансформаторов недопустима, то придется снизить общую нагрузку. При значительной разнице коэффициентов трансформации нормальная работа трансформаторов становится практически невозможной. Однако допускается включение на параллельную работу трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, если разница коэффициентов трансформации не превышает ±0,5% их среднего значения:

$$\Delta k = [(k_I - k_{II}) / k]100 \le 0{,}5\%,$$

где $k = \sqrt{k_I k_{II}}$ — среднее геометрическое значение коэффициентов трансформации.

2. Трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения. При несоблюдении этого условия вторичные линейные напряжения трансформаторов окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга, и в цепи трансформаторов появится разностное напряжение ΔU (рис. 40, б), под действием которого возникнет значительный уравнительный ток. Так, если включить на параллельную работу два трансформатора, один из которых принадлежит к нулевой, а другой — к 11-й группе соединения, то их линейные напряжения окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга на 30° (рис. 40, б). При этом появится разностное напряжение

$$\Delta U = 2U_2 \sin 15^\circ = 0{,}52U_2 .$$

Если при этом включенные трансформаторы имели одинаковые номинальные мощности и сопротивления КЗ, то ΔU создало бы уравнительный ток

$$I_{ур} = \Delta U / 2z_к = 0{,}26U_2 / z_к,$$

т.е. этот ток составлял бы 26% от тока установившегося КЗ, что примерно в 3-5 раз превысило номинальный ток трансформатора.

3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания $u_{кI} = u_{кII} = u_{кIII} = \ldots$. Если же при соблюдении прочих условий два или несколько трансформаторов с различными напряжениями КЗ включены параллельно, то нагрузки S_I и S_{II} между трансформаторами распределяются обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания:

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{u_{кI}}{u_{кI}} \cdot \frac{S_{номI}}{S_{номII}}, \quad (65)$$

т. е. трансформаторы нагружаются непропорционально их номинальным мощностям, что ведет к перегрузке одного трансформатора (с меньшим $u_к$) и недогрузке другого. Чтобы не допустить перегрузки трансформатора, необходимо снизить обитую нагрузку. Таким образом, неравенство напряжений КЗ не допускает полного использования параллельно работающих трансформаторов по мощности.

Учитывая,что практически не всегда можно подобрать трансформаторы с одинаковыми напряжениями КЗ, допускается включение трансформаторов на параллельную работу при разнице напряжений КЗ не более чем 10% от их среднего арифметического значения. Разница в напряжениях КЗ трансформаторов тем больше, чем больше эти трансформаторы отличаются друг от друга по мощности. Поэтому рекомендуется, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов, включенных параллельно, было не более чем 3:1.

Помимо соблюдения указанных трех условий необходимо перед включением трансформаторов на параллельную работу проверить порядок чередования фаз, который должен быть одинаковым у всех трансформаторов. При соблюдении этого условия показания вольтметров *У^и V^* равны нулю (см. рис. 39, б). Эти вольтметры должны быть рассчитаны на удвоенное напряжение сети.

Общая нагрузка всех включенных на параллельную работу трансформаторов не должна превышать суммарной номинальной мощности этих трансформаторов.

Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами определяется следующим образом:

$$S_x = \frac{S}{u_{кз} \sum (S_{ном\,x} / u_{кз})} S_{ном\,x}, \quad (66)$$

где S_x — нагрузка одного из параллельно работающих трансформаторов, кВ • А; S — общая нагрузка всей параллельной группы, кВ • А; $u_{кз}$ — напряжение КЗ данного трансформатора, %; $S_{ном\,x}$ — номинальная мощность данного трансформатора, кВ • А.

Тогда

$$\sum \frac{S_{ном\,x}}{x_к} = \frac{S_{ном\,I}}{x_{кI}} + \frac{S_{ном\,II}}{x_{кII}} + \frac{S_{ном\,III}}{x_{кIII}} + \ldots \qquad (67)$$

11.7. Трехобмоточные трансформаторы

В трехобмоточном трансформаторе на каждую трансформируемую фазу приходятся три обмотки. За номинальную мощность такого трансформатора принимают номинальную мощность наиболее мощной его обмотки. Токи, напряжения и сопротивления других обмоток приводят к числу витков этой, наиболее мошной, обмотки. Принцип работы трехобмоточного трансформатора по существу не отличается от принципа работы обычного двухобмоточного трансформатора.

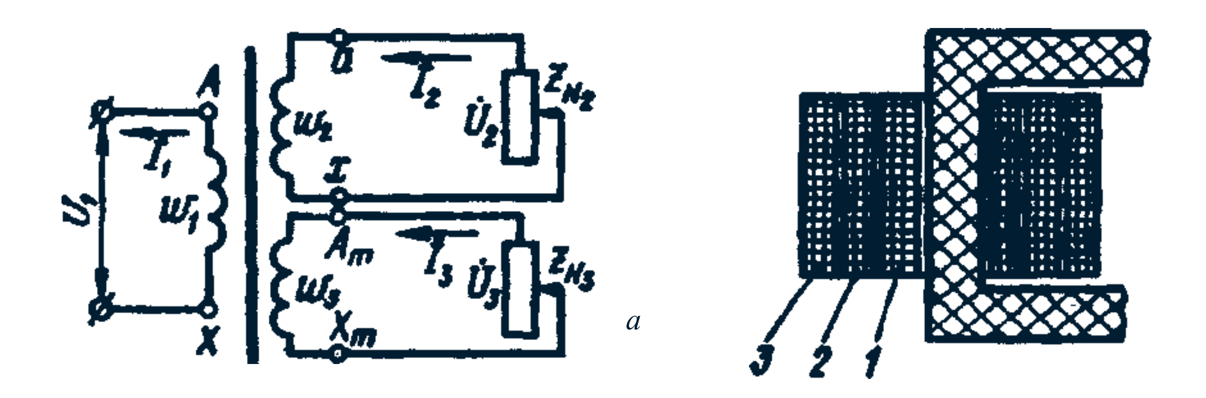


Рис. 41. Трехобмоточный трансформатор с одной первичной и двумя вторичными об мотками-.принципиальная схема (а); расположение обмоток на стержне (б)

Существуют Трехобмоточные трансформаторы с одной первичной и двумя вторичными обмотками и трансформаторы с двумя первичными и одной вторичной обмотками.

Рассмотрим основные уравнения, эксплуатацию и область применения трехобмоточного трансформатора с одной первичной обмоткой, имеющего наибольшее распространение (рис. 41, а). Первичная (наиболее мощная) об-

мотка этого трансформатора является намагничивающей и создает в магнитопроводе магнитный поток, который сцепляется с двумя вторичными обмотками и наводит в них ЭДС Е^и *Е3*- Аналогично двухобмоточному трансформатору запишем для трехобмоточного трансформатора уравнение НС:

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_3 w_3 = \dot{I}_0 w_1 \qquad (68)$$

Разделив на w_1, получим уравнения токов:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = \dot{I}_0, \qquad (69)$$

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 / k_{12}; \quad \dot{I}'_3 = \dot{I}_3 / k_{13} . \qquad (70)$$

Здесь $k_{12} = w_1 / w_2$ — коэффициент трансформации между обмотками w_1 и w_2; $k_{13} = w_1 / w_3$ — коэффициент трансформации между обмотками w_1 и w_3.

Пренебрегая током холостого хода $\dot{I}_0$, получим упрощенное уравнение токов трехобмоточного трансформатора:

$$\dot{I}_1 \approx (\dot{I}'_2 + \dot{I}'_3) . \qquad (71)$$

Экономическую целесообразность применения трехобмоточных трансформаторов можно объяснить тем, что, как это следует из (71), первичный ток трехобмоточного трансформатора равен не арифметической, а геометрической сумме приведенных вторичных токов. Учитывая это равенство, а также и то, что нагрузка на вторичные обмотки достигает номинального значения не одновременно, первичную обмотку трехобмоточного трансформатора рассчитывают на мощность, меньшую суммы номинальных мощностей обеих вторичных обмоток.

Еще одно достоинство трехобмоточных трансформаторов состоит в том, что он фактически заменяет два двухобмоточных.

Обмотки трехобмоточного трансформатора располагаются на стержне обычно концентрически (рис. 41, б), при этом целесообразнее двустороннее расположение вторичных обмоток относительно первичной, тогда первичной является обмотка 2, а вторичными — 7 и 3. В этом случае взаимное влияние вторичных обмоток заметно ослабевает.

На крупных электростанциях иногда применяют трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными обмотками (к каждой из них подключается генератор) и одной вторичной (от нее отходит линия электропередачи). Обычно это установки весьма большой мощности, а поэтому в них применяют однофазные трехобмоточные трансформаторы, соединенные в трансформаторную группу.

12. Несимметричные режимы работы и переходные процессы в трансформаторах

Основные понятия

Причинами несимметричных режимов могут быть неравномерная нагрузка по фазам от включения однофазных потребителей (нагревательные, осветительные установки и др.), обрыв провода, короткие замыкания.

При исследовании несимметричных режимов трансформаторов и электрических машин переменного тока используют *метод симметричных составляющих*. Сущность этого метода состоит в том, что каждый из векторов несимметричной трехфазной системы (ток или напряжение) раскладывают на сумму из трех векторов. Например, несимметричную трехфазную систему токов можно представить уравнениями:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0};\ \dot{I}_b = \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0};\ \dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0}. \quad (72)$$

Первые слагаемые $\dot{I}_{a1}$, $\dot{I}_{b1}$ и $\dot{I}_{c1}$ по величине равны, но сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° в такой же последовательности, что и у исходной системы (рис. 42, а); будем эту последовательность называть *прямой*. Другими словами, эти токи образуют симметричную трехфазную систему прямой последовательности.

Вторые слагаемые $\dot{I}_{a2}$, $\dot{I}_{b2}$ и $\dot{I}_{c2}$ также равны друг другу по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120°, но в другой — *обратной* последовательности, т. е. эти токи образуют симметричную трехфазную систему обратной последовательности (рис. 42, б).

Третьи слагаемые $\dot{I}_{a0}$, $\dot{I}_{b0}$ и $\dot{I}_{c0}$ равны и совпадают по фазе друг с другом, и каждый из них равен 1/3 суммы токов заданной несимметричной системы:

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0} = (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c)/3\,. \quad (73)$$

Эти слагаемые образуют систему токов *нулевой* последовательности (рис. 42, в).

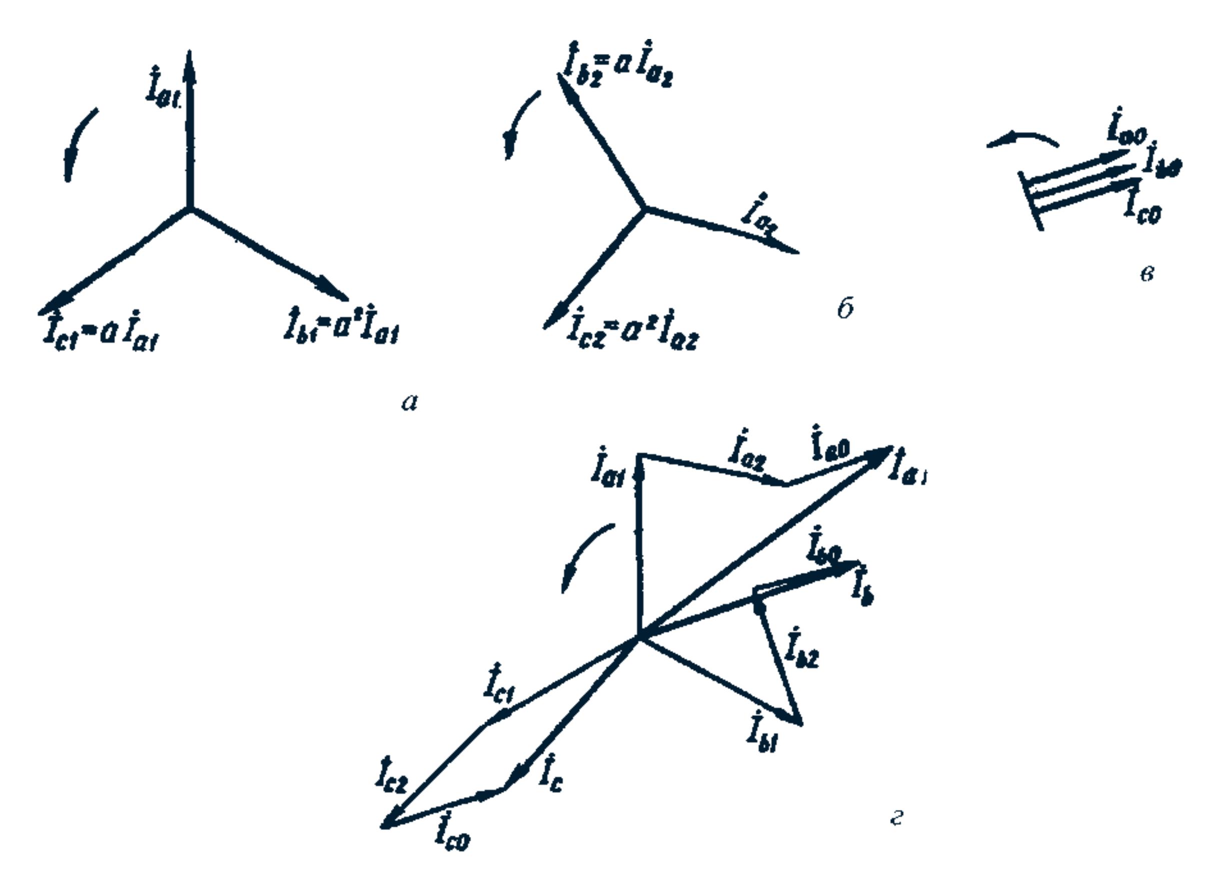


Рис. 42. Симметричные и несимметричная составляющие трехфазной системы токов

Далее, в целях упрощения записи и удобства преобразований уравнений введем комплексный коэффициент

$$a = e^{j2\pi/3} = \cos(2\pi/3) + j\sin(2\pi/3) = -0{,}5 + j\sqrt{3}/2 . \qquad (74)$$

Умножение какого-либо вектора на этот коэффициент означает поворот этого вектора на 120° в направлении вращения векторов (против часовой стрелки). Умножение вектора на

$$a^2 = e^{j4\pi/3} = e^{-j2\pi/3} = \cos(-2\pi/3) + j\sin(-2\pi/3) = -0{,}5 - j\sqrt{3}/2$$

(75)

означает поворот этого вектора на 240° в направлении вращения векторов (или на 120° в направлении, противоположном вращению векторов). Если же какой-либо вектор умножить на

$$a^3 = e^{j2\pi} = \cos 2\pi + j\sin 2\pi = 1, \quad (76)$$

то это не изменит пространственное положение вектора. Вполне очевидно, что

$$a + a^2 + a^3 = a + a^2 + 1 = 0. \quad (77)$$

Используя комплексный коэффициент, (72) можно записать в следующем виде:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \quad (78)$$

$$\dot{I}_b = a^2\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \quad (79)$$

$$\dot{I}_c = a\dot{I}_{a1} + a^2\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}, \quad (80)$$

где слагаемые всех уравнений выражены через векторы только фазы *A*. Умножив (79) на комплексный коэффициент *a*, (80) — на a^2 и сложив полученные уравнения с (78) с учетом (74) — (77), получим:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0};$$

$$a\dot{I}_b = \dot{I}_{a1} + a^2\dot{I}_{a2} + a\dot{I}_{a0};$$

$$\underline{a^2\dot{I}_c = \dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} + a^2\dot{I}_{a0};}$$

$$\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c = 3\dot{I}_{a1};$$

откуда вектор симметричной трехфазной системы прямой последовательности

$$\dot{I}_{a1} = (\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c)/3\,. \quad (81)$$

Затем, умножив (79) на a^2 и (80) — на а и сложив их с (78), получим

$$\dot{I}_{a2} = (\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c)/3\,. \quad (82)$$

Таким образом, при заданных векторах 1_a, /^ и 1_C трехфазной несимметричной системы (рис. 42, г) по уравнениям (73), (81) и (82) можно определить векторы токов симметричных трехфазных систем нулевой, прямой и обратной последовательностей.

13. Переходные процессы в трансформаторах

При переходе трансформатора из одного установившегося режима в другой возникают переходные процессы. Так как каждый установившийся режим характеризуется определенным значением энергии электромагнитных полей, то в течение переходного процесса происходит изменение энергии этих полей. Наибольший практический интерес представляют переходные процессы при включении трансформатора и коротком замыкании на зажимах вторичной обмотки.

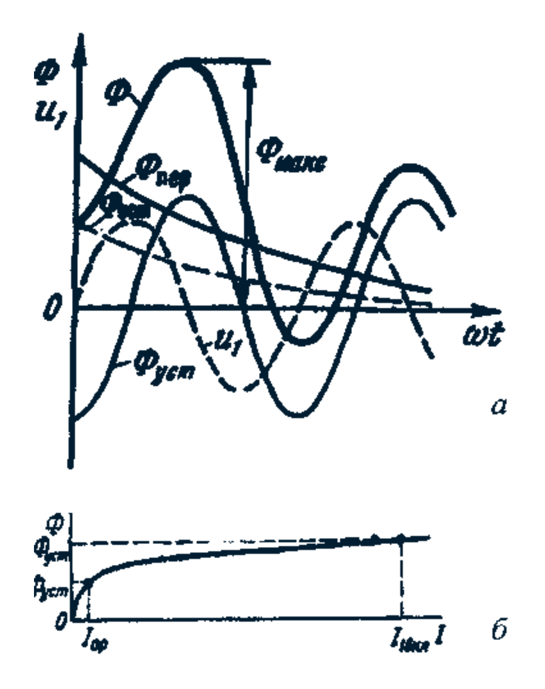


Рис. 43. Графики переходных процессов при включении трансформатора (а) и определение тока включения трансформатора по кривой намагничивания (б)

Включение трансформатора в сеть. В этом случае результирующий магнитный поток можно рассматривать как сумму трех составляющих:

$$Ф = Ф_{уст} + Ф_{пер} \pm Ф_{ост},$$

где $Ф_{уст}$ — магнитный поток установившийся; $Ф_{пер}$ — магнитный поток переходного процесса; $Ф_{ост}$ — магнитный поток остаточного магнетизма, который может быть направлен согласно с установившимся потоком (знак плюс) или встречно ему (знак минус).

Магнитный поток переходного процесса — затухающий и постоянен по направлению.

Наиболее бл агоприятный случай включения трансформатора в сеть будет при потоке остаточного магнетизма, направленном встречно установившемуся потоку, и при мгновенном значении первичного напряжения

Ui = О. При этом магнитный поток установившийся $Ф_{уст}$ будет максимальным, так как он отстает по фазе от напряжения на угол приблизительно 90° (рис. 43, а). Магнитный поток $Ф$ становится наибольшим

приблизительно через половину периода после включения трансформатора. Если магнитопровод трансформатора не насыщен, то в момент включения трансформатора в первичной обмотке появится намагничивающий ток, пропорциональный магнитному потоку. Если же магнитопровод трансформатора насыщен, то при включении трансформатора намагничивающей ток включения достигает более значительного броска. Из построений, сделанных на кривой намагничивания (рис. 43, б), видно, что при магнитном потоке, превышающем в два раза установившееся значение *Ф — Ф*$_{уст}$, намагничивающий ток включения достигает величины, во много раз превышающей установившееся значение тока холостого хода *(1*$_{вкл}$ *» IQ*$_P$*}*, при наиболее неблагоприятных

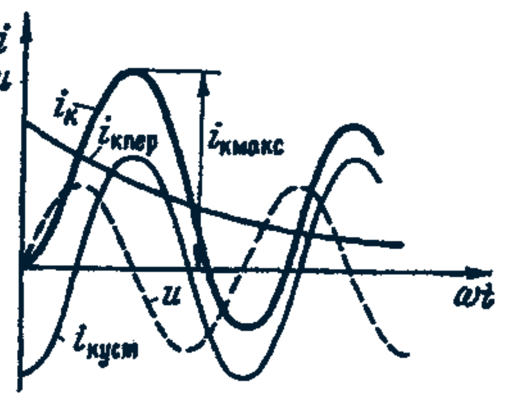


Рис. 44. Графики переходных ппоиессов ппи внезапном КЗ

условиях ток включения может в 6—8 раз превысить номинальное значение первичного тока.

Так как длительность переходного процесса невелика и не превосходит нескольких периодов переменного тока, то ток включения не представляет опасности непосредственно для трансформатора. Но этот ток следует учитывать при регулировке аппаратуры защиты, чтобы в момент включения трансформатора не произошло его неправильного отключения от сети. Бросок тока включения следует также учитывать при наличии в цепи первичной обмотки трансформатора чувствительных измерительных приборов. Во избежание поломки этих приборов нужно до включения трансформатора в сеть шунтировать их токовые обмотки.

Внезапное короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки трансформатора. Оно возникает из-за различных неисправностей: механического повреждения изоляции или ее электрического пробоя при перенапряжениях, ошибочных действий обслуживающего персонала и др. Короткое замыкание — это аварийный режим, и может привести к разрушению трансформатора.

При внезапном КЗ на зажимах вторичной обмотки в трансформатора возникает переходный процесс, который сопровождается возникновением большого мгновенного тока КЗ i_K. Этот ток можно рассматривать как ре-

зультирующий двух токов: установившегося тока КЗ $1_{К\ уст}$ и тока переходного процесса $Г_{к\ уст}$ постоянного по направлению, но убывающего по экспоненциальному закону:

$$i_к = i_{к.уст} + i_{к.пер}$$

Наиболее неблагоприятные условия КЗ могут быть в момент, когда мгновенное значение первичного напряжения равно нулю (^=0). На рисунке 44 построена кривая тока КЗ $i_К$ для этого условия. Ток внезапного КЗ (ударный ток) может достигать двойного значения установившегося тока КЗ и в 20—40 раз превышать номинальное значение тока.

Переходный процесс при внезапном КЗ у трансформаторов малой мощности длится не более одного периода, а у трансформаторов большой мощности — 6—7 периодов. Затем трансформатор переходит в режим установившегося КЗ, при котором в обмотках протекают токи $г_{к\ уст}$, величина которых

хотя и меньше тока $г_к$ при переходном процессе, но все же во много раз превышает номинальное значение тока. Через несколько секунд срабатывают защитные устройства, отключающие трансформатор от сети. Но несмотря на кратковременность процесса КЗ, он представляет собой значительную опасность для обмоток трансформатора: во-первых, чрезмерно большой ток КЗ резко повышает температуру обмотки, что может повредить ее изоляцию; во-вторых, резко увеличиваются электромагнитные силы в обмотках трансформатора.

Величина электромагнитной силы, действующей на витки обмоток, определяется произведением магнитной индукции поля рассеяния B_a на величину тока / в витке обмотки:

$$F = B_\sigma i\ ,$$

где F—удельная электромагнитная сила, Н/м.

Но с увеличением тока растет также и индукция поля рассеяния, поэто-

^

му сила растет пропорционально квадрату тока ($F = i$). Так, если ток в витке / = 100 А и индукция Б^ОДтл, то F=0,l • 100 = 10 Н/м.

Такая сила не вызывает заметных деформаций витков обмотки, но если при внезапном КЗ бросок тока достигнет значения $i_К$, превышающего номинальный ток в 30 раз, то электромагнитная сила возрастет в 900 раз и станет равной 9000 Н/м. Такая сила может вызвать значительные механические разрушения в трансформаторе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом можно уменьшить потери в стали трансформатора?
2. Увеличивается или уменьшается наводимая ЭДС во вторичной обмотке трансформатора при замене ферромагнитного сердечника на медный?
3. Изменится ли КПД трансформатора, если магнитопровод из электротехнической стали заменить на магнитопровод изготовленный из листов обыкновенной стали?
4. Как доказать, что после приведения вторичной обмотки трансформатора к первичной магнитный поток, КПД, COS$> остались неизменными?
5. Как изменится ток трансформатора, работающего на активную нагрузку при переходе частоты сети 50 Гц на частоту 60 Гц? То же при работе на индуктивную нагрузку и на емкостную нагрузку?
6. Как изменятся характеристики трансформатора, если в первичную обмотку включить :а) реостат; б) индуктивность; в) емкость?
7. Как изменятся параметры и характеристики трансформатора,если увеличить сечение первичной обмотки?
8. Вследствие чего при увеличении нагрузки изменяется напряжение на вторичной обмотке трансформатора?
9. В каком случае с ростом нагрузки увеличивается напряжение во вторичной обмотке трансформатора?
10. Почему при активной нагрузке трансформатора коэффициент мощности первичной цепи не равен единице?
11. При каких условиях ток включения силового трансформатора в сеть без нагрузки может превысить номинальное значение тока?
12. Первичную обмотку однофазного трансформатора уменьшили на несколько витков. Уменьшится или увеличится напряжение на выводах вторичной обмотки, если первичная обмотка включена под номинальное напряжение?
13. Первичную обмотку трехфазного трансформатора вместо соединения по схеме «треугольник», соединили по схеме «звезда». Как повлияет такое соединение на ток холостого хода • на потери в стали и в меди -} на значение магнитной индукции?
14. Два трансформатора с номинальной нагрузкой и группами соединений Y*ГУ-2* и Y/Y-4 ошибочно включили на параллельную работу. Во сколько раз изменится ток через трансформаторы, если Z_K=0,1?
15. Определите самое неудачное сочетание групп двух трансформаторов при включении их на параллельную работу.
16. Какие группы соединения могут быть получены при одинаковой схеме соединения ВН и НН?

17. Влияние конструкции трансформатора и схемы соединения обмоток трансформатора на токи и магнитные потоки третьей гармоники.
18. Почему с увеличением первичного напряжения, при опыте холостого хода, уменьшается COS$? трансформатора?
19. Может ли ток холостого хода трансформатора быть больше тока нагрузки?
20. Будет ли изменяться ток холостого хода и как при увеличении или уменьшении сечения стержней магнитопровода трансформатора?
21. Почему с ростом напряжения в режиме короткого замыкания ток растет прямолинейно, а мощность криволинейно?
22. Почему мощность холостого хода принимаем за магнитные потери, а мощность короткого замыкания за электрические потери?
23. При каких условиях КПД трансформатора является максимальным?
24. От чего зависит распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами?
25. Почему у всех силовых трансформаторов имеются ответвления для регулирования напряжения?
26. Понятие «ударный ток» в режиме внезапного короткого замыкания трансформатора, зависимость величины ударного тока от параметров трансформатора.
27. Суть метода симметричных составляющих при анализе несимметричных режимов работы трансформатора.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1

Определить ток и коэффициент мощности трансформатора при холостом ходе, напряжение $U_1 = 220$ кВ, если намагничивающая сила $F = 1252$ А, а число витков первичной обмотки равно $w_1 = 150$, потери в стали $p_c = 99$ Вт.

Решение

Намагничивающая составляющая тока холостого хода

$$I_{0p} = \frac{F}{w} = \frac{1252}{150} \approx 8{,}4 \text{ А.}$$

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{0a} = \frac{p_c}{U_1} = \frac{99}{220} \approx 0{,}45 \text{ А.}$$

Ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 - I_{0p}^2} = \sqrt{0{,}45^2 - 8{,}4^2} \approx 8{,}42 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности

$$cos\,\varphi = \frac{I_{0a}}{I_0} = \frac{0{,}45}{8{,}42} \approx 0{,}054 \ .$$

Задача 2

Определить ток короткого замыкания, напряжение короткого замыкания, ток холостого хода при питании трансформатора со сторон первичной и вторичной обмоток. Номинальная мощность $S_{ном} = 10500$ кВ • А, напряжение $U_1 = 110$ кВ, $U_2 = 6{,}3$ кВ, $u_к = 10{,}5$ %, ток $I_0 = 3{,}3$ %.

Решение

При питании трансформатора со стороны 110 кВ напряжение короткого замыкания

$$u_{1к} = \frac{u_к}{100} \cdot U_1 = \frac{10{,}5}{100} \cdot 110 \approx 11{,}5 \text{ кВ.}$$

Номинальный ток

$$I_1 = \frac{S_{ном}}{U_1} = \frac{10500}{110} \approx 95{,}5 \text{ А.}$$

Ток холостого хода

$$I_{01} = \frac{I_0}{100} \cdot I_1 = \frac{3{,}3}{100} \cdot 95{,}5 \approx 3{,}14 \text{ А.}$$

Ток короткого замыкания при подведении к первичной обмотке номинального напряжения

$$I_{1к} = \frac{U_1}{u_{1к}} \cdot I_1 = \frac{110}{11{,}5} \cdot 95{,}5 \approx 914 \text{ А.}$$

При питании трансформатора со стороны 6,3 кВ напряжение короткого замыкания

$$u_{2к} = \frac{u_к}{100} \cdot U_2 = \frac{10{,}5}{100} \cdot 6{,}3 \approx 0{,}66 \text{ кВ.}$$

Номинальный ток

$$I_2 = \frac{S_{ном}}{U_1} = \frac{10500}{6{,}3} \approx 1670 \text{ А.}$$

Ток холостого хода

$$I_{02} = \frac{I_0}{100} \cdot I_2 = \frac{3{,}3}{100} \cdot 1670 \approx 55 \text{ А.}$$

Ток короткого замыкания при подведении к первичной обмотке номинального напряжения

$$I_{2к} = \frac{U_2}{u_{2к}} \cdot I_2 = \frac{6{,}3}{0{,}66} \cdot 1670 \approx 16200 \text{ А.}$$

Задача 3

Для трансформатора определить сопротивления и коэфициент мощности при коротком замыкании: $u_{1к} = 11{,}5$ кВ, $I_1 = 95{,}5$ А, $P_к = 81{,}5$ кВт.

Решение

Полное сопротивление цепи короткого замыкания трансформатора

$$z_к = \frac{U_1}{I_1} = \frac{11{,}5 \cdot 10^3}{95{,}5} \approx 120 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление

$$r_к = \frac{P_к}{I_1^2} = \frac{81{,}5 \cdot 10^3}{95{,}5^2} \approx 9 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление

$$x_к = \sqrt{z_к^2 - r_к^2} = \sqrt{120^2 - 9^2} \approx 119{,}5 \text{ Ом.}$$

Коэффициент мощности при работе в режиме короткого замыкания

$$cos\,\varphi = \frac{r_к}{z_к} = \frac{9}{120} \approx 0{,}075 \; .$$

Задача 4

Для трансформатора определить активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания. Номинальная мощность $S_н = 10500$ кВ•А, номинальное напряжение $U_н = 110$ кВ, мощность короткого замыкания $P_к = 81{,}5$ кВт. Напряжение короткого замыкания $u_к = 0{,}5\%$

Решение

Активная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$u_{ка}[\%] = \frac{P_к}{10 S_н} = \frac{81{,}5 \cdot 10^3}{10 \cdot 10500} \approx 0{,}775\%,$$

$$u_{ка} = U_н \frac{u_{ка}[\%]}{100} = 110 \cdot \frac{0{,}775}{100} = 0{,}852 \text{ кВ}$$

Индуктивная составляющая

$$u_{кх}[\%] = \sqrt{u_к^2 - u_{ка}^2} = \sqrt{110^2 - 0{,}775^2} \approx 10{,}45\%,$$

$$u_{кх} = U_н \frac{u_{кх}[\%]}{100} = 110 \cdot \frac{10{,}45}{100} = 11{,}5 \text{ кВ} \; .$$

Задача 5

Определить изменения напряжения Δu для нагрузки трансформатора, равной 0,75 при $\cos\varphi_2 = 0{,}8$, $u_к = 5{,}5\%$, $u_{ка} = 3\%$, $u_{кх} = 4{,}7\%$.

Решение

Величина значения Δu определяется по упрощенной формуле:

$$\Delta u_{[\%]} = u_{ка[\%]} \cos\varphi_2 + u_{кх[\%]} \sin\varphi_2,$$

$$\Delta u_{[\%]} = 3\% \cdot 0{,}8 + 4{,}7\% \cdot 0{,}6 = 3{,}92\%$$

по точной формуле:

$$\Delta u_{[\%]} = u_{ка[\%]} \cos\varphi_2 + u_{кх[\%]} \sin\varphi_2 + \frac{(u_{кх[\%]} \cos\varphi_2 - u_{ка[\%]} \sin\varphi_2)^2}{200}$$

$$\Delta u_{[\%]} = 3{,}94\% .$$

Задача 6

Определить наибольшее значение КПД для трехфазного трансформатора. Номинальная мощность $S_{ном} = 50$ кВ • А, потери холостого хода $P_0 = 0{,}35$ кВт, потери короткого замыкания $P_к = 1{,}32$ кВт, $\cos\varphi_2 = 1$.

Решение

При максимальном КПД значение коэффициента нагрузки

$$\beta = \sqrt{P_0 / P_к} = \sqrt{0{,}35/1{,}32} \approx 0{,}516.$$

Величина КПД

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_к}{\beta S_{ном} \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_к} =$$

$$= 1 - \frac{0{,}35 + 0{,}516^2 \cdot 1{,}32}{0{,}516 \cdot 50 \cdot 1 + 0{,}35 + 0{,}516^2 \cdot 1{,}32} = 0{,}974 .$$

Задача 7

Сравнить максимальные значения КПД при нагрузках с $\cos\varphi = 0{,}8$ для двух трансформаторов. Номинальная мощность

$S_{ном1} = S_{ном2} = 560$ кВ • А, потери холостого хода $P_{01} = P_{02} = 2{,}5$ кВт, потери короткого замыкания $P_{к1} = 9{,}4$ кВт, $P_{к1} = 7{,}2$ кВт.

Решение

Коэффициент нагрузки, при котором КПД максимален для первого трансформатора:

$$\beta = \sqrt{P_{01} / P_{к1}} = \sqrt{2{,}5/9{,}4} \approx 0{,}518,$$

для второго трансформатора:

$$\beta = \sqrt{2{,}5/7{,}2} \approx 0{,}59$$

Максимальный КПД для первого трансформатора:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_к}{\beta\, S_{ном} \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_к} =$$

$$= 1 - \frac{2{,}5 + 0{,}518^2 \cdot 9{,}4}{0{,}518 \cdot 560 \cdot 0{,}8 + 2{,}5 + 0{,}518^2 \cdot 9{,}4} = 0{,}997,$$

для второго трансформатора:

$$\eta = 1 - \frac{2{,}5 + 0{,}59^2 \cdot 9{,}2}{0{,}59 \cdot 560 \cdot 0{,}8 + 2{,}5 + 0{,}59^2 \cdot 7{,}2} = 0{,}998.$$

Задача 8

Определить уравнительный ток ,протекающий между трансформаторами I и II, работающими параллельно, включенными в сеть с напряжением $U_1 = 6{,}3$ кВ, частотой $f = 50$ Гц. Трансформаторы имеют одинаковые группы соединений Y/Y - 12, но разнятся по напряжениям на $\Delta U = 5$ %. Трансформатор I: $S_{ном} = 100$ кВ • А, $u_к = 5{,}5$ %, $P_0 = 0{,}75$ кВт, $P_к = 2{,}4$ кВт, $I_1 = 9{,}65$ А; трансформатор II: $S_{ном} = 180$ кВ • А, $u_к = 5{,}5$ %, $P_0 = 1$ кВт, $P_к = 4$ кВт, $I_1 = 17{,}3$ А.

Решение

Напряжение короткого замыкания при питании трансформаторов со стороны 6 кВ

$$u_к = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u_к}{100} = \frac{6000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{5{,}5}{100} \approx 191 \text{ В}.$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_{каI} = \frac{P_{кI}}{10S_{номI}} = \frac{2{,}4 \cdot 10^3}{10 \cdot 100} \approx 2{,}4\ \%;$$

$$u_{каII} = \frac{4 \cdot 10^3}{10 \cdot 180} \approx 2{,}22\ \%,$$

или

$$u_{каI} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u_{каI}}{100} = \frac{6000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2{,}4}{100} \approx 83\ \text{В};$$

$$u_{каII} == \frac{6000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2{,}22}{100} \approx 77\ \text{В}.$$

Индуктивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_{крI} = \sqrt{u_{кI}^2 - u_{каI}^2} = \sqrt{191^2 - 83^2} \approx 172\ \text{В};$$

$$u_{крII} = \sqrt{191^2 - 77^2} \approx 175\ \text{В}.$$

Сопротивление трансформаторов:

$$z_{кI} = \frac{u_{кI}}{I_{1I}} = \frac{191}{9{,}65} \approx 19{,}8\ \text{Ом}; \qquad z_{кII} = \frac{191}{17{,}3} \approx 11\ \text{Ом};$$

$$r_{кI} = \frac{u_{каI}}{I_{1I}} = \frac{83}{9{,}65} \approx 8{,}6\ \text{Ом}; \qquad r_{кII} = \frac{77}{17{,}3} \approx 4{,}45\ \text{Ом};$$

$$x_{кI} = \frac{u_{крI}}{I_{1I}} = \frac{172}{9{,}65} \approx 17{,}8\ \text{Ом}; \qquad x_{кII} = \frac{175}{17{,}3} \approx 10{,}1\ \text{Ом};$$

$$z_{кI} = 8{,}6 + j17{,}8\ \text{Ом}; \qquad z_{кII} = 4{,}45 + j10{,}1\ \text{Ом}.$$

Разность ЭДС на фазу

$$\Delta E = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta U}{100} = \frac{6000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{5}{100} = 172\ \text{В}.$$

Общее сопротивление трансформаторов

$$z = z_{кI} + z_{кII} = 8{,}6 + j17{,}8 + 4{,}45 + j10{,}1 = 13{,}05 + j27{,}9\ \text{Ом}.$$

Уравнительный ток

$$I_у = \frac{\Delta U}{z} = \frac{173}{13{,}05 + j27{,}9} = 2{,}38 + j5{,}1\ \text{А}$$

или

$$I_y = \sqrt{2{,}38^2 + j5{,}1^2} \approx 5{,}63 \text{ А.}$$

Задача 9

Определить уравнительный ток, который будет протекать между параллельно работающими двумя одинаковыми трансформаторами, имеющими разные группы соединения. $S_{ном} = 1000$ кВ · А, $U_1 = 6$ кВ, $u_к = 5{,}5$ %, группа соединения первого трансформатора Y/Y - 12, второго - Y/Д - 11.

Решение

Номинальный ток со стороны 6 кВ

$$I_1 = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6} \approx 96{,}5 \text{ А.}$$

Напряжение короткого замыкания на фазу

$$u_к = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u_к}{100} = \frac{6000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{5{,}5}{100} \approx 191 \text{ В.}$$

Сопротивление трансформатора

$$z_{1к} = \frac{u_к}{I_1} = \frac{191}{96{,}5} \approx 1{,}98 \text{ Ом.}$$

Разность ЭДС

$$\Delta E = 2E_ф \sin\frac{\alpha}{2} = 2\frac{6}{\sqrt{3}} \sin\frac{30}{2} \cdot 10^3 \approx 1790 \text{ В.}$$

Уравнительный ток

$$I_y = \frac{\Delta E}{2z_{1к}} = \frac{1790}{2 \cdot 1{,}98} \approx 452 \text{ А}$$

и превосходит номинальный ток в $\frac{I_y}{I_1} = \frac{452}{96{,}5} \approx 4{,}7$ раза.

Задача 10

Определить установившийся ток короткого замыкания для трансформатора. $S_{ном} = 1000$ кВ · А, $U_1 = 6$ кВ, $u_к = 5{,}5$ %.

Решение

Номинальный ток

$$I_1 = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6} \approx 96{,}5 \text{ А.}$$

Кратность установившегося тока короткого замыкания

$$m = \frac{100}{u_к} = \frac{100}{5{,}5} = 18{,}2.$$

Действующее значение установившегося тока короткого замыкания

$$I_{1к} = I_1 m_к = 96{,}5 \cdot 18{,}2 = 1755 \text{ А.}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980.
3. Кацман М.М. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1969.
4. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Токарев Б.Ф. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия, 1970.

Оглавление

Учебное издание **КИСЛИЦЫН Анатолий Леонидович**

Трансформаторы
Учебное пособие

Редактор Н.А. Евдокимова
Компьютерную верстку выполнил А.В. Бугров

Изд. лиц. 020640 от 22.10.97. Подписано в печать 05.12.2000
Формат 60х84/16. Бумага офсетная. Усл.п.л.4,42.
Уч.-изд.л. 4,40 • Тираж 150 экз. Заказ *4&OO.*

Ульяновский государственный технический университет,
432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32. Типография
УлГТУ, 432027, г.Ульяновск, Сев. Венец, 32.